



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Evaluación del grado de daño de las estructuras mediante la variación temporal de sus frecuencias propias

Treball realitzat per:

Carolina Seguí Fernández

Dirigit per:

Oriol Caselles Magallon

Sergio Alberto Díaz Alvarado

Màster en:

Enginyeria del Terreny

Barcelona, 23 de Juny de 2016

Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i
Geofísica

TREBALL FINAL DE MÀSTER

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecerles a mis tutores el Dr. Oriol Caselles y el Prof. Sergio Díaz el gran apoyo y dedicación a este trabajo y todo lo que he aprendido y disfrutado trabajando con ellos.

Agradecer al Dr. Xavier Lana de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona (UPC) por enseñarme el funcionamiento del programa SPSS. También a la Universidad Politécnica de Cataluña por ceder las licencias de los programas Autocad, Matlab y SPSS.

Por último dar las gracias a mi familia y amigos por el apoyo recibido durante estos meses, en especial a mi abuelo Julio, mi madre Milagros y mi incondicional Roko, que siempre me han dado ánimo y fuerzas para continuar y han estado a mi lado, dedicando así este trabajo a ellos.

RESUMEN

El presente trabajo trata de evaluar el grado de daño de una estructura mediante la variación temporal de sus frecuencias propias. El estudio se basa en un análisis de componentes principales, un modelado numérico de la estructura y un estudio de variabilidad frecuencial con un análisis de componentes principales.

La estructura estudiada es una maqueta a escala metálica de 5 pisos con unas medidas de 1.7 m de altura, 1.44 m de longitud y 0.77 m de profundidad, unida a una mesa vibratoria. Tiene colocados 12 acelerómetros piezoeléctricos (Brüel & Kjaer 4370) distribuidos en las distintas plantas.

Los ensayos se han realizado golpeando la mesa vibratoria, que está unida a la base de la estructura, con una pelota de 2 Kg y una fuerza de 9.4 N. Los ensayos se han realizado con la estructura íntegra y aplicando 4 daños distintos; se ha variado la temperatura de la estructura 15°C aproximadamente en cada uno de los ensayos de grado en grado.

Los resultados obtenidos de los ensayos son espectros de frecuencia-amplitud, frecuencia-fase y coherencia-fase. Mediante éstos se ha realizado un análisis modal operacional para obtener el comportamiento de la estructura a temperatura ambiente y sin daño aplicado. Los resultados muestran la dirección, el sentido y el desplazamiento de cada nodo de la estructura donde hay un sensor colocado.

También se ha realizado un modelado numérico de la estructura que ha permitido saber el tipo de unión de la estructura a la mesa vibratoria gracias a la comparación de los datos de laboratorio con los del modelo empotrado y modelo articulado efectuados en un primer lugar. Este modelo ha necesitado una calibración para ajustarse al modelo real. Esta calibración se ha realizado mediante los datos obtenidos del ensayo modal operacional. Con el modelado se ha obtenido el comportamiento de toda la estructura tanto para todos los daños aplicados como para la estructura sin ningún daño.

Por tanto, el modelado numérico ha proporcionado información que con el análisis modal operacional faltaba. Con el análisis modal se ha obtenido el comportamiento de la estructura en una sección, mientras que con el modelado numérico se ha obtenido de toda la estructura.

Finalmente se ha realizado un estudio de variabilidad frecuencial, es decir, la variación de la frecuencia dentro de cada ensayo para las distintas temperaturas. La finalidad es saber si de las medidas de la frecuencia a cada temperatura se puede inferir el grado de daño de la estructura. En todos los casos se ha obtenido que a mayor temperatura, la frecuencia disminuye levemente.

También se ha realizado un análisis de componentes principales con las frecuencias y temperaturas de cada modo para así obtener el número de componentes que necesita cada uno de los ensayos. Comprobando que a mayor daño aplicado más componentes son necesarias y a menor daño se necesitan menos.

El objetivo de todo ello es poder evaluar si la estructura está dañada o no, su grado de daño y la respuesta de ésta frente a una vibración externa. Todo ello mediante estudios de variabilidad frecuencial, análisis modal operacional y la realización de un modelo numérico de la estructura.

ABSTRACT

The present work tries to assess the damage degree to a structure by temporal variation of their own frequencies. The study is based on a principal component analysis, numerical modeling of the structure and a study of frequency variability with principal component analysis.

The studied structure is a scale metallic model of 5 floors with dimensions of 1.7 m high, 1.44 m long and 0.77 m deep, connected to a vibrating table. The structure has 12 piezoelectric accelerometers (Brüel & Kjaer 4370) installed and distributed in different floors.

The tests were executed bumping the vibrating table, which is connected to the structure base, with 2 kg ball and 9.4 N stress. The tests were carried out with the whole structure and applying 4 different damage; the structure temperature has modified 15°C approximately on each grade to grade test.

The tests results are frequency-amplitude spectrum, frequency-phase and coherence-phase. Through these spectrums has been execute an operational modal analysis for the structure behavior at ambient temperature without damage applied. The results show the direction and the displacement of each structure node where a sensor is placed.

It has also executed a numerical modeling of the structure that has allowed to know the joint type of the structure to the vibrating table by comparing laboratory data with the articulated model and set-in model made in the first place. This model has needed a calibration to adjust to the real model. This calibration was carried out using data from the operational modal test. With the structure modeling has obtained the whole structure behavior for all damages applied and for the structure without any damage.

Therefore, numerical modeling has provided information that lacked with the operational modal analysis. The modal analysis obtains the structure behavior in one section, and the numerical modeling gets the behavior of the entire structure.

Finally a study of variability frequency were executed, i.e. the frequency variation in each test for different temperatures. The aim is known if the frequency measures at each temperature can deduce the damage degree of the structure. In all cases it has been obtained that for a higher temperature the frequency decreases slightly.

The principal components analysis has also carried out with the frequencies and temperatures of each mode to obtain the number of components required by each test. Proving that further damage applied more components are necessary and minor damage needs less.

The aim of all the studies is to assess if the structure is damaged or not, the degree of damage and the response of the structure against external vibration. All of that through studies of frequency variability, operational modal analysis and executing a numerical model of the structure.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	8
1.1 Introducción	9
1.2 Antecedentes	9
1.3 Objetivos	10
1.4 Contenido de la memoria.....	11
CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	12
2.1 Análisis modal operacional	13
2.1.1 Análisis modal tradicional	13
2.1.2 Análisis modal operacional.....	15
2.2 Modelado numérico.....	18
2.2.1 Metodología del modelado numérico en estructuras	18
2.2.2 Programas para el modelado numérico estructural	20
2.3 Componentes principales.....	20
2.3.1 Fases del análisis de componentes principales.....	20
2.4 Variabilidad frecuencial.....	21
2.4.1 Vibración	22
2.4.2 Variación frecuencial.....	23
2.4.3 Escala de medida frecuencial	24
CAPÍTULO 3. MODELADO EXPERIMENTAL	25
3.1 Modelo estructural	26
3.2 Sistema de medidas dinámicas	28
3.2.1 Descripción general.....	28
3.2.2 Acelerómetros.....	31
3.2.3 Acondicionador	34
3.2.4 Grabador	36
3.3 Cámara térmica.....	37
3.4. Ensayos dinámicos del modelo	39
3.4.1 Ensayos del análisis modal operacional	39
3.4.2 Ensayos de la variación de las frecuencias modales con la temperatura	40

3.5 Procesado de los datos	42
3.6 Variabilidad Frecuencial	44
CAPÍTULO 4. RESULTADOS	46
4.1 Análisis modal	47
4.2 Modelado numérico	52
4.2.1 Procedimiento del modelado numérico	52
4.2.2 Resultados del modelado numérico.....	56
4.2.3 Caso daño aplicado	76
4.3 Variabilidad frecuencial.....	79
4.3.1 Modos de los ensayos	79
4.3.2 Componentes principales.....	84
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.....	93
5.1 Conclusiones.....	94
5.2 Ampliación y líneas futuras de trabajo.....	95
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97

LISTADO DE FIGURAS

Figura 2.1. Señal aleatoria donde se representan: valor de pico a pico, valor de pico, RMS y media (Rodríguez, 2005).	23
Figura 2.2. Espectro de frecuencias con cuatro picos (Rodríguez, 2005).	23
Figura 3.1. Estructura y mesa del laboratorio.	26
Figura 3.2. Vistas de la elevación longitudinal (izquierda), transversal (central) con las cargas añadidas y sección en planta de la estructura. Las unidades de la estructura están en milímetros.	27
Figura 3.3. Vista de la sección de las columnas (izquierda) y las vigas (derecha). Las unidades están en milímetros.	28
Figura 3.4. Fotografía de la estructura con los acelerómetros indicados en rojo (dirección transversal) y verde (dirección longitudinal), el número al lado de cada acelerómetro indica el canal de registro.	29
Figura 3.5. Dos acelerómetros de uno de los nodos de la estructura.	30
Figura 3.6. Tres amplificadores con sus respectivas conexiones a los acelerómetros.	30
Figura 3.7. Grabador con las conexiones de los 12 acelerómetros.	30
Figura 3.8. Acelerómetro piezoeléctrico modelo 4370 (Bruël & Kjaer, 2016).	31
Figura 3.9. Esquema representativo del acelerómetro 4370 (Bruël & Kjaer, 2016).	31
Figura 3.10. Curvas de respuesta frecuencial del acelerómetro 4370 (Bruël & Kjaer, 2016).	32
Figura 3.11. Acelerómetro piezoeléctrico modelo 4371 (Bruël & Kjaer, 2016).	32
Figura 3.12. Esquema representativo del acelerómetro 4371 (Bruël & Kjaer, 2016).	32
Figura 3.13. Curvas de respuesta frecuencial del acelerómetro 4371 (Bruël & Kjaer, 2016).	33
Figura 3.14. Acelerómetro piezoeléctrico modelo 4384 (Bruël & Kjaer, 2016).	33
Figura 3.15. Esquema representativo del acelerómetro 4384 (Bruël & Kjaer, 2016).	34
Figura 3.16. Curvas de respuesta frecuencial del acelerómetro 4384 (Bruël & Kjaer, 2016).	34
Figura 3.17. Amplificador modelo 2635 (Bruël & Kjaer, 2016).	35
Figura 3.18. Diagrama en bloque del amplificador 2635 (Bruël & Kjaer, 2016).	35
Figura 3.19. Curvas de respuesta frecuencial en posición lineal (aceleración) y con integradores para la velocidad y el desplazamiento. Los filtros pasa baja no se muestran (Bruël & Kjaer, 2016).	36
Figura 3.20. Grabador/registrador modelo 3053 (Bruël & Kjaer, 2016).	37

Figura 3.21. Cámara Thermo GEAR G100EX (Nippon Avionics Co., LTD., 2016).	38
Figura 3.22. Imagen térmica con indicación del rango de la temperatura a la izquierda, e imagen de la estructura a la derecha.	38
Figura 3.23. Estructura y mesa vibratoria. La flecha blanca indica el lugar donde se ha golpeado con la pelota.	39
Figura 3.24. Fotografía de la estructura en la que se ha señalado en rojo el lugar del daño aplicado.	40
Figura 3.25. Fotografía de la estructura en la que se ha señalado en rojo el lugar del daño aplicado.	41
Figura 3.26. Fotografía de la estructura en la que se han señalado en rojo los lugares del daño aplicado.	41
Imagen 3.27. Fotografía de la estructura en la que se han señalado en rojo los lugares del daño aplicado.	42
Figura 3.28. Acelerogramas de los 12 canales (acelerómetros) del ensayo sin daño aplicado a 24 grados de temperatura.	43
Figura 3.29. Fase del espectro cruzado (Superior), coherencia (segunda) y densidades de energía espectral de los canales 1 y 2 (inferiores) del ensayo sin daño aplicado a 18 grados.	43
Figura 4.1. Forma modal del modo 1.	47
Figura 4.2. Forma modal del modo 2.	48
Figura 4.3. Forma modal del modo 3.	48
Figura 4.4. Forma modal del modo 4.	49
Figura 4.5. Forma modal del modo 5.	49
Figura 4.6. Forma modal del modo 6.	50
Figura 4.7. Forma modal del modo 7.	50
Figura 4.8. Forma modal del modo 8.	51
Figura 4.9. Forma modal del modo 9.	51
Figura 4.10. Forma modal del modo 10.	52
Figura 4.11. Captura de pantalla del programa SAP2000 donde se muestra el modelo en 2-D y 3D.	53
Figura 4.12. Captura de pantalla del programa SAP2000 donde se muestra el modelo en 2-D y 3-D con las secciones de columnas y vigas asignadas.	55
Figura 4.13. Captura de pantalla del programa SAP2000 donde se muestra el modelo en 2-D y 3-D con las cargas muertas asignadas en el centro de cada viga.	55
Figura 4.14. Diagramas en 2-D (sección transversal) y 3-D de deformación del modo 1.	58
Figura 4.15. Diagramas en 2-D (sección longitudinal) y 3-D de deformación del modo 2.	59

Figura 4.16. Diagramas en 2-D (secciones transversal y longitudinal) y 3-D de deformación del modo 3.	60
Figura 4.17. Diagramas en 2-D (secciones transversal y longitudinal) y 3-D de deformación del modo 4.	61
Figura 4.18. Diagramas en 2-D (sección longitudinal) y 3-D de deformación del modo 5.	62
Figura 4.19. Diagramas en 2-D (secciones transversal y longitudinal) y 3-D de deformación del modo 6.	63
Figura 4.20. Diagramas en 2-D (secciones transversal y longitudinal) y 3-D de deformación del modo 7.	64
Figura 4.21. Diagramas en 2-D (secciones transversal y longitudinal) y 3-D de deformación del modo 8.	65
Figura 4.22. Diagramas en 2-D (sección transversal) y 3-D de deformación del modo 9.	66
Figura 4.23. Diagramas en 2-D (sección transversal) y 3-D de deformación del modo 1.	68
Figura 4.24. Diagramas en 2-D (sección longitudinal) y 3-D de deformación del modo 2.	69
Figura 4.25. Diagramas en 2-D (secciones transversal y longitudinal) y 3-D de deformación del modo 3.	70
Figura 4.26. Diagramas en 2-D (secciones transversal y longitudinal) y 3-D de deformación del modo 4.	71
Figura 4.27. Diagramas en 2-D (sección longitudinal) y 3-D de deformación del modo 5.	72
Figura 4.28. Diagramas en 2-D (secciones transversal y longitudinal) y 3-D de deformación del modo 6.	73
Figura 4.29. Diagramas en 2-D (secciones transversal y longitudinal) y 3-D de deformación del modo 7.	74
Figura 4.30. Diagramas en 2-D (secciones transversal y longitudinal) y 3-D de deformación del modo 8.	75
Figura 4.31. Evolución de los modos respecto a la temperatura.	79
Figura 4.32. Evolución de los modos respecto a la temperatura.	80
Figura 4.33. Evolución de los modos respecto a la temperatura.	81
Figura 4.34. Evolución de los modos respecto a la temperatura.	82
Figura 4.35. Evolución de los modos respecto a la temperatura.	83

LISTADO DE TABLAS

Tabla 4.1. Valores de amplitud, fase y coherencia de todos los canales del ensayo sin daño aplicado a temperatura ambiente para el modo 2.516.	47
Tabla 4.2. Valores de amplitud, fase y coherencia de todos los canales del ensayo sin daño aplicado a temperatura ambiente para el modo 2.578.	48
Tabla 4.3. Valores de amplitud, fase y coherencia de todos los canales del ensayo sin daño aplicado a temperatura ambiente para el modo 3.734.	48
Tabla 4.4. Valores de amplitud, fase y coherencia de todos los canales del ensayo sin daño aplicado a temperatura ambiente para el modo 7.641.	49
Tabla 4.5. Valores de amplitud, fase y coherencia de todos los canales del ensayo sin daño aplicado a temperatura ambiente para el modo 8.844.	49
Tabla 4.6. Valores de amplitud, fase y coherencia de todos los canales del ensayo sin daño aplicado a temperatura ambiente para el modo 9.234.	50
Tabla 4.7. Valores de amplitud, fase y coherencia de todos los canales del ensayo sin daño aplicado a temperatura ambiente para el modo 12.23.	50
Tabla 4.8. Valores de amplitud, fase y coherencia de todos los canales del ensayo sin daño aplicado a temperatura ambiente para el modo 13.02.	51
Tabla 4.9. Valores de amplitud, fase y coherencia de todos los canales del ensayo sin daño aplicado a temperatura ambiente para el modo 14.31.	51
Tabla 4.10. Valores de amplitud, fase y coherencia de todos los canales del ensayo sin daño aplicado a temperatura ambiente para el modo 16.87.	52
Tabla 4.11. Valores de las frecuencias de los dos modelos en SAP y del ensayo experimental.	56
Tabla 4.12. Valores de las frecuencias del modelo articulado en SAP y del ensayo experimental.	57
Tabla 4.13. Valores de las frecuencias del modelo empotrado en SAP y del ensayo experimental.	67
Tabla 4.14. Valores de las frecuencias del modelo empotrado en SAP y del ensayo experimental.	77
Tabla 4.15. Valores de las frecuencias del modelo empotrado en SAP y del ensayo experimental.	77
Tabla 4.16. Valores de las frecuencias del modelo empotrado en SAP y del ensayo experimental.	78
Tabla 4.17. Valores de las frecuencias del modelo empotrado en SAP y del ensayo experimental.	78
Tabla 4.18. Modos del ensayo a diferentes temperaturas.	79
Tabla 4.19. Modos del ensayo a diferentes temperaturas.	80
Tabla 4.20. Modos del ensayo a diferentes temperaturas.	81
Tabla 4.21. Modos del ensayo a diferentes temperaturas.	82
Tabla 4.22. Modos del ensayo a diferentes temperaturas y a temperatura ambiente con la posición invertida de los acelerómetros.	83
Tabla 4.23. Modos del ensayo de daño simple izquierda.	84

Tabla 4.24. Modos del ensayo de daño simple derecha.	84
Tabla 4.25. Modos del ensayo de daño doble.	84
Tabla 4.26. Modos del ensayo de daño generalizado.	85
Tabla 4.27. Modos del ensayo sin daño aplicado.	85
Tabla 4.28. Varianza total explicada del ensayo de daño simple izquierda.	85
Tabla 4.29. Varianza total explicada del ensayo de daño simple derecha.	87
Tabla 4.30. Varianza total explicada del ensayo de daño doble.	88
Tabla 4.31. Varianza total explicada del ensayo de daño generalizado.	89
Tabla 4.32. Varianza total explicada del ensayo sin daño aplicado.	90

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En este capítulo se presenta una introducción explicando los precedentes, los trabajos previos que se han realizado, los objetivos de esta tesina y una breve descripción del contenido de este trabajo.

1.1 Introducción

Algunos países del mundo situados en zonas de alto riesgo sísmico han sido afectados con grandes terremotos. El protocolo a seguir después de un terremoto de gran magnitud es que un ingeniero inspeccione los edificios para ver su estado. En ocasiones el edificio estaba tan dañado estructuralmente que cuando se ha producido una réplica del terremoto éste se ha derrumbado, acabando así con vidas de personas.

Por este motivo, en países con tecnología muy avanzada y con gran inversión en sistemas de evaluación rápidos como Japón, se hace un estudio del estado de cada edificio. Así, cuando se produce un terremoto de gran magnitud, mediante un sistema de evaluación rápida se puede deducir el estado de la estructura sin necesidad de entrar en los edificios y correr riesgos.

Estos estudios consisten en saber el estado de la estructura, en evaluar con el tiempo el comportamiento de ésta y si hay algún daño oculto. Se realizan en edificios importantes como: colegios, hospitales y gubernamentales, ya que en caso de catástrofe tienen que seguir funcionando.

1.2 Antecedentes

Anteriormente se han hecho algunos estudios relacionados con el análisis modal operacional y modelación numérica de estructuras. A continuación se citan algunos de ellos.

Brincker *et al.* (2001) publicaron un artículo sobre la identificación modal de sistemas únicamente de salida usando la descomposición del dominio de frecuencias. Los estudios se aplicaron en un modelo de edificio de dos plantas en el que se estimaron las frecuencias naturales y los factores de amortiguamiento.

Benedettini y Gentile (2007) publicaron un artículo sobre la vibración ambiental y el análisis modal operacional realizado en una torre de mampostería. Ésta es la catedral de Teramo construida a finales del siglo XV con 48 m de altura. El estudio consistió en monitorizar con acelerómetros la catedral y realizar un análisis modal operacional, obteniendo los modos y haciendo un modelado numérico de la estructura.

Gentile y Saisi (2007) publicaron un artículo sobre ensayos de vibración ambiental de una torre de mampostería para la identificación estructural y la evaluación de daños. La estructura trataba de una torre construida en el siglo XVII con 74 m de altura. El estudio consistió en monitorizar la torre con acelerómetros, realizar un análisis modal operacional y el modelado numérico mediante elementos finitos.

Le y Tamura (2009) publicaron un artículo sobre la identificación modal de la vibración ambiental de una estructura usando la descomposición en dominios de frecuencia y la transformada de Wavelet. Los estudios se aplicaron a una estructura metálica de 5 plantas monitorizada con acelerómetros en cada una de ellas.

Como se puede comprobar, cada estudio se realiza a diferentes tipos de estructuras ya sean de materiales de fabricación, hormigón, metálicos o mixtos. También bajo distintas condiciones como ambientales, provocadas, con daños aplicados, sin daños, etc. Y, finalmente, con diferente instrumentación como tipos de acelerómetros y lugares de colocación en la estructura.

En base a los puntos anteriores, el estudio realizado en esta tesina se ha basado en encontrar parámetros similares al del resto, ya que se ha realizado un análisis modal operacional mediante la variación frecuencial y un modelado numérico de la estructura pero en condiciones totalmente distintas ya que se ha ensayado en una estructura metálica a escala en un laboratorio, no en una estructura real.

1.3 Objetivos

Con el fin de evaluar los daños en una estructura de forma cuantitativa y cualitativamente, se ha realizado:

- Un análisis modal operacional. A partir de los resultados de los ensayos de laboratorio a temperatura ambiente y sin daño para obtener las frecuencias y formas modales de la estructura.
- Un modelado numérico de la estructura efectuado con el programa SAP 2000 para la obtención la forma modal de toda la estructura en cada modo de vibración.
- Un estudio de variabilidad frecuencial con la frecuencia dependiendo de los distintos daños producidos en la estructura. También se ha realizado un análisis en componentes principales con el programa SPSS para cada daño generado, y mediante el estudio de la reducción de la dimensionalidad del conjunto de datos inferir el grado de daño.

Los objetivos concretos de esta tesina son:

1. Realización de ensayos en laboratorio.
2. Aprendizaje del funcionamiento del programa Matlab a nivel intermedio.
3. Aprendizaje del procesado de los datos del acelerómetro en el programa Matlab.
4. Realización del análisis modal operacional.
5. Aprendizaje del funcionamiento del programa SAP2000 a nivel de usuario.
6. Realización del modelado numérico de la estructura en el programa SAP2000.
7. Realización del análisis de la variabilidad frecuencial.
8. Aprendizaje del funcionamiento del programa SPSS a nivel de usuario.
9. Estudio del análisis de componentes principales en el programa SPSS.

1.4 Contenido de la memoria

Tras esta introducción, en el Capítulo 2 se explicarán los fundamentos teóricos del análisis modal operacional, el modelado numérico, el análisis de componentes principales y la variabilidad frecuencial.

El Capítulo 3 se centra en explicar el modelo estructural, el sistema de medidas dinámicas utilizado en el laboratorio y también la cámara térmica, los ensayos dinámicos aplicados al modelo, el procesado de los datos obtenidos en laboratorio y, finalmente, la variabilidad frecuencial.

En el Capítulo 4 se presentan los resultados.

En el Capítulo 5 se describen las conclusiones obtenidas y propuestas de futuros trabajos.

CAPÍTULO 2

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En el Capítulo 2 se definen los fundamentos teóricos del análisis modal operacional, el modelado numérico, el análisis de componentes principales y la variabilidad frecuencial.

2.1 Análisis modal operacional

En este apartado se explica en que consiste el análisis modal tradicional y el análisis modal operacional según Rodríguez (2005).

2.1.1 Análisis modal tradicional

El análisis modal operacional es un método mediante el que se describe una estructura en términos de sus propiedades dinámicas o parámetros modales que son la frecuencia, el amortiguamiento y los modos de vibración, para todos los modos en el rango de frecuencias de interés. Todas las estructuras poseen frecuencias naturales y modos de vibración que dependen principalmente de la masa y la rigidez de la estructura. En el diseño es necesario identificar esas frecuencias y conocer cómo afectan a la respuesta de la estructura ante una fuerza actuando sobre la misma. El análisis modal es una herramienta eficiente para describir, comprender y modelar el comportamiento de las estructuras en el régimen lineal.

Una definición simplificada del análisis modal sería una comparación con el análisis en frecuencia. En el análisis en frecuencia, una señal compleja se descompone en una serie de simples ondas sinusoidales con parámetros de amplitud y frecuencia individuales. En el análisis modal, una deformación compleja de una estructura se descompone en una serie de modos de deformación simples con parámetros de frecuencia y amortiguamiento individuales. Su objetivo es la construcción de un modelo modal del comportamiento de la estructura.

Estos análisis estudian la estructura sometida a una excitación conocida para obtener un modelo matemático del comportamiento dinámico de la estructura. El procedimiento consiste en la adquisición de datos, su análisis y la determinación de todos los parámetros modales.

Los parámetros modales son importantes porque describen las propiedades dinámicas inherentes de una estructura. Conocer el amortiguamiento modal es muy útil para predecir la vida a fatiga y reducir las respuestas en resonancia. En un ensayo dinámico se aplica una carga dinámica a la estructura. Dicha carga tiene componentes en un cierto rango de frecuencias y la estructura responde a todas ellas, pero entrará en resonancia cuando las componentes coincidan con las frecuencias naturales de la estructura. La respuesta de la estructura será una superposición lineal de todos los modos de vibración excitados. Una propiedad importante de los modos es que cualquier respuesta de la estructura dentro del régimen lineal puede ser expresada como una combinación de una serie de modos.

Cada pico de respuesta de una estructura puede ser representado por un modelo físico de un grado de libertad. Este modelo consiste en una masa puntual, sostenida por un muelle sin masa y conectada con un amortiguador viscoso. Además dicha masa tiene restringido todos sus

movimientos excepto uno, el que comprime el muelle y el amortiguador. También se puede hacer un modelo matemático que describe el comportamiento de este sistema de un grado de libertad en el dominio del tiempo, mediante la aplicación de la segunda ley de Newton al modelo físico.

Las utilidades del análisis modal son:

- Comprender como se comportan las estructuras bajo la acción de fuerzas dinámicas.
- Medir las propiedades de la estructura cuando se somete a una vibración para refinar y validar modelos analíticos.
- Desarrollar un modelo.
- Controlar la integridad de cierta estructura y su comportamiento.
- Comprobar el estado de las estructuras después de sufrir daños.
- Ayudar en el diseño de todo tipo de estructuras y hacer simulaciones en el desarrollo de prototipos.
- Predecir o simular la respuesta a excitaciones externas o cómo se comportará la estructura bajo otras condiciones de operación diferentes.
- Simular cambios en las características dinámicas.
- Estimar las fuerzas que actúan sobre la estructura.
- Hacer un análisis del ensamblaje e estructuras.

Hay dos tipos de técnicas de excitación: las que permanecen en contacto con la estructura durante el ensayo y las que no. Las primeras pueden proporcionar una excitación continua (sinusoidal, aleatoria, etc.) o transitoria (pulso), y para ello se emplean los excitadores electromecánicos, electromagnéticos y electrohidráulicos. La otra técnica sólo está en contacto durante un periodo de tiempo corto, mientras se aplica la excitación, como son el impacto y la excitación estática. Las fuerzas externas que se aplican determinan el contenido en frecuencia de la respuesta.

El impacto es la técnica de excitación más conocida para el análisis modal, mediante un excitador tipo martillo. La duración del impacto normalmente es muy corta en comparación con el tiempo que hay que medir la respuesta. La medida de la señal de fuerza durante el impacto es muy importante, ya que la señal que permanece luego solo es ruido, como ruido eléctrico o por la propia vibración del martillo después del impacto. Con este tipo de excitación se consigue excitar un gran número de modos de vibración tanto de flexión como de torsión, y ha demostrado ser una forma sencilla y efectiva de excitar grandes estructuras. Se usa a menudo para el análisis modal de sistemas estructurales lineales ya que es fácil mover la fuente de excitación de un punto a otro mientras que los acelerómetros permanecen en posiciones fijas.

Para técnica de excitación estática, un método muy empleado consiste en aplicar una carga estática a una estructura y retirarla repentinamente. En este caso el excitador puede ser cualquier masa. Cuando se retira la carga solo se excitan aquellos modos que contribuyen a la deflexión estática producida por la carga aplicada. Por tanto, aquellos modos que presenten un nodo en el punto de aplicación de la carga no serán excitados. Se usa mucho para ensayar grandes estructuras como las de la industria aeroespacial, plataformas petrolíferas “offshore”, puentes o ejes de grandes turbinas.

2.1.2 Análisis modal operacional

El análisis modal operacional se basa en la medida de la respuesta de la estructura usando sólo las señales de salidas, desconociendo las fuerzas que actúan sobre la misma. Se suele usar para obtener una descripción modal de la estructura bajo sus condiciones de operación o ruido ambiental. En vez de cargar la estructura artificialmente y tratar la excitación ambiental como una fuente de ruido no deseado, la excitación natural o de funcionamiento se usa como fuente de excitación.

Sólo mide la respuesta de la estructura debido a las excitaciones no artificialmente introducidas y luego se analizan para obtener casi la misma información que se puede obtener con el análisis modal tradicional, ya que las masas modales no se pueden obtener sin el conocimiento de las fuerzas de entrada.

Para ensayos con excitación ambiental se supone que las fuerzas desconocidas se aplican simultáneamente. Además se supone que la fuerza de entrada es un ruido blanco, es decir, no es una función de la frecuencia y tiene un espectro con un valor medio constante para cada frecuencia.

Se emplea cuando las estructuras que se desean estudiar no es conveniente excitarlas por medio de un excitador. Algunas porque son difíciles de excitar artificialmente debido a su tamaño, forma o localización. Para muchas estructuras grandes puede ser complicado excitarlas artificialmente a un nivel tal que la respuesta debida a factores ambientales (no controlables) sea pequeña en comparación con la otra artificial. Hay otros casos en los que surgen problemas debido a no linealidades introducidas por un nivel de respuesta muy elevado por emplear métodos artificiales de excitación. Además, todas las estructuras suelen estar sometidas a acciones como las fuerzas ambientales, como por ejemplo el viento, las olas, el tráfico y también su propia maquinaria pueden generar vibraciones.

Las principales ventajas de este tipo de ensayo son:

- Menor tiempo para realizar el ensayo, ya que sólo hay que colocar los equipos de medida.
- Económico, ya que no necesita la adquisición de equipos excitadores y puede realizarse in situ.
- El ensayo no interfiere ni interrumpe el funcionamiento normal de la estructura, por lo que puede seguir estando en servicio mientras se realiza.
- La respuesta medida es representativa de las condiciones reales de funcionamiento de la estructura.
- Se evita la aplicación de cargas artificiales que conllevan un riesgo de dañar la estructura.

El uso de este tipo de ensayos produce respuestas pequeñas y, a menudo, mezcladas con ruido. Como la excitación es desconocida, el análisis es más difícil que en el caso tradicional. Las principales desventajas son:

- Se necesitan equipos muy sensibles.
- Es necesario un análisis de datos cuidadoso.

Existen muchos métodos para realizar el análisis modal operacional. Algunos de ellos como el *Peak Picking*, Descomposición en el Dominio de la Frecuencia, NExT/ERA e Identificación de Subespacios Estocásticos se explicarán a continuación.

- *Peak Picking* (PP)

Es el método más simple conocido para identificar los parámetros modales de estructuras de ingeniería civil sujetas a cargas ambientales. Se basa en que la función de respuesta en frecuencia alcanza valores extremos en torno a las frecuencias naturales. Dichas frecuencias se obtienen observando la gráfica de la función de densidad espectral promediada y normalizada. Es una técnica que se desarrolla en el dominio de la frecuencia. Los algoritmos en el dominio de la frecuencia son más usados debido a su simplicidad y su velocidad de realización.

A pesar de que las fuerzas de entrada no se miden, esto se resuelve adoptando una técnica de identificación de parámetros modales derivada de la tradicional, en la que las funciones de respuesta en frecuencia y la función de coherencia se calculan para cada punto de medida con respecto a la medida de referencia. Por tanto, la señal del sensor de referencia se usa como entrada. La función de transferencia representa la relación entre la respuesta medida por un sensor cualquiera y el de referencia. Por lo que todas las funciones de transferencia están relacionadas en este tipo de análisis con la respuesta medida por el sensor de referencia. Esto ayuda en la identificación de las resonancias. La función de coherencia entre respuestas para dos registros simultáneos tiene valores próximos a uno en las frecuencias de resonancia debido a la alta relación señal-ruido a estas frecuencias. Consecuentemente, la inspección de la función de coherencia puede ayudar a la elección de dichas frecuencias.

Las frecuencias naturales se determinan como los picos de la función densidad espectral promediada y normalizada. Esta función se obtiene convirtiendo las medidas de aceleraciones al dominio de la frecuencia mediante la transformada de Fourier discreta.

No se puede conocer si la respuesta dinámica en los picos de resonancia viene determinada sólo por un modo. Cuanto más separados están los modos y menor es el amortiguamiento de la estructura más probable es que el pico de resonancia solo sea causado por un modo de vibración.

- Descomposición en el Dominio de la Frecuencia (FDD)

Es un procedimiento muy simple que representa una mejora significativa del método anterior (Rodríguez, 2005). Primero se introducen las bases teóricas. La relación entre las desconocidas entradas $x(t)$ y las respuestas medidas $y(t)$ se puede expresar de la siguiente manera:

$$G_{yy}(j\omega) = \bar{H}(j\omega)G_{xx}(j\omega)H(j\omega)^T \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Donde $G_{xx}(j\omega)$ es la matriz de densidad espectral de la entrada, $G_{yy}(j\omega)$ es la matriz de densidades espectrales de las salidas, m es el número de salidas, $H(j\omega)$ es la matriz conocida como función de respuesta en frecuencia, y los superíndices “-” y “T” indican matriz compleja conjugada y matriz sólo transpuesta respectivamente. Las densidades espectrales representan cómo se distribuye la energía para todas las frecuencias.

Una vez se describen los fundamentos teóricos, se describe el algoritmo de identificación. Primero se estima la matriz de densidades espectrales. Una vez obtenidos los valores para las frecuencias discretas se descompone por medio de la Descomposición en valores singulares, en una matriz de vectores singulares y una matriz diagonal de valores singulares.

Una ventaja de este método es la identificación fácil de modos de vibración muy próximos, examinando no sólo el mayor valor singular, sino también los siguientes. Una vez se ha identificado el modo de vibración se ajusta la curva alrededor del pico seleccionado para obtener la frecuencia natural.

- NExT (Técnica de Excitación Natural)

Es un método de caracterización modal que permite ensayar las estructuras en su propio ambiente. Es simple y efectivo. El mayor prerequisite es que la localización y la orientación de la referencia se deben elegir de manera que todos los modos relevantes puedan ser captados. Es decir, el acelerómetro de referencia hay que colocarlo en un punto que no sea nodo de ningún modo de vibración de los que se quiere identificar. Es un proceso de cuatro pasos diseñado para estimar los parámetros modales de estructuras excitadas por sus propias cargas de operación. Este método permite que los datos de respuesta forzada sean tratados como datos de respuesta libre.

Primero se obtienen las respuestas de la estructura en funcionamiento normal, en los que son necesarios los sensores de fuerza, desplazamiento, velocidad o aceleración. Es conveniente hacer registros de cierta duración ya que las condiciones de operación de muchas estructuras son bastante estacionarias.

El segundo paso consiste en calcular las funciones de auto correlación y de correlación cruzada a partir de las medidas tomadas. Las funciones de correlación se pueden expresar como un sumatorio de las señales sinusoidales amortiguadas, teniendo cada una de estas señales una frecuencia natural amortiguada y un coeficiente de amortiguamiento que es idéntico al del correspondiente modo estructural.

En tercer lugar se usa una identificación en el dominio del tiempo para estimar los parámetros tratando las funciones de correlación como si fueran la respuesta libre de una excitación, es decir, como si se excitara el sistema y se dejara que oscile libremente.

Y el último paso consiste en estimar los modos de vibración a partir de los coeficientes de amortiguamiento y frecuencias naturales identificadas.

- ERA (Eigensystem Realization Algorithm)

Su objetivo es el cálculo de las matrices del sistema a partir de las medidas realizadas. Este método es un análisis de los parámetros de un sistema basado en la relación entre la matriz de Hankel y el espacio de estados que definen el sistema. Con este procedimiento se pueden identificar incluso dos modos de vibración que se encuentren muy cercanos. Se suelen utilizar los métodos NExT y ERA juntos.

El algoritmo ERA toma los datos de funciones de correlación cruzada y construye un sistema de espacio de estados en el que los parámetros modales de la estructura pueden ser identificados. Luego crea la matriz de Hankel de los datos de respuesta libre y posteriormente realiza una Descomposición en Valores Singulares. Una vez se han calculado los valores singulares, los mayores se considera que son los que realmente caracterizan la estructura. A partir de aquí ya se pueden obtener los modos de vibración y demás parámetros modales.

- Identificación de Subespacios Estocásticos (SII)

Es un método de identificación en el dominio del tiempo que trabaja directamente con los datos temporales medidos, sin necesidad de convertirlos en espectros o correlaciones.

Probablemente sea el método de identificación de sistemas para vibraciones ambientales más avanzado que se conoce hasta la fecha, aunque no siempre proporciona los mejores resultados.

En algunos casos, con la técnica de la Descomposición en el Dominio de la Frecuencia se obtienen mejores estimaciones tanto de los modos como de los coeficientes de amortiguamiento que empleando la técnica SII. Aunque las aproximaciones de los parámetros modales que se obtienen con ambos métodos son buenas y bastante parecidas.

Esta técnica permite detectar frecuencias que posiblemente se perderían mediante el método *Peak Picking*, y además obtiene una mejor aproximación de los modos de vibración para todos los casos. La carga computacional del SII es significativamente mayor que la del *Peak Picking*, pero la calidad de identificación también es mayor.

Sin embargo, este tipo de métodos no es infalible y puede producir errores por muchas razones ya que, además de todas las suposiciones que se hacen, también hay aproximaciones.

2.2 Modelado numérico

El modelado numérico (o modelización numérica) es una técnica basada en el cálculo numérico, utilizada en muchos campos de estudio para validar o refutar modelos conceptuales propuestos a partir de observaciones o derivados de teorías anteriores. Si el cálculo de las ecuaciones que representan el modelo propuesto es capaz de ajustar las observaciones, entonces se habla de un modelo consistente con las mismas, y se dice también que el modelo numérico confirma las hipótesis (el modelo); si el cálculo no permite en ningún caso reproducir las observaciones, se habla de un modelo inconsistente con los datos y que refuta el modelo conceptual. A menudo, este término se utiliza como sinónimo de simulación numérica (Muñoz y Maristany, 2002).

La modelización numérica de edificios representa una herramienta prácticamente imprescindible para entender su comportamiento estructural, más si de lo que se trata es de asumir un estudio para su conservación y/o rehabilitación. Actualmente, la mayoría de los programas informáticos de simulación numérica de edificios se dividen en tres partes: el pre-proceso, el cual prepara toda la información necesaria (geometría, condiciones de borde, cargas, etc.); el análisis, donde se desarrollan todos los cálculos y el post-proceso donde se analizan y toman decisiones en base a los resultados obtenidos en los pasos anteriores.

En el post-proceso es donde el usuario de los programas de cálculo se encuentra con las mayores dificultades de interpretación de resultados. Por ello es importante contar con herramientas tanto de hard como de soft que permitan visualizar los datos obtenidos. Actualmente, aparecen cantidad de programas de análisis estructural que tienen sus post-procesos muy avanzados.

2.2.1 Metodología del modelado numérico en estructuras

Dentro de la construcción de un modelo existen tres procesos a desarrollar:

- El primero, llamado Pre-proceso, en el que se define todo lo relacionado a la geometría del edificio y la entrada de datos en general.

- El Análisis, donde, dependiendo del tipo de problema, se aplican las distintas teorías de análisis estructural (sistema de barras, de placa, elasticidad bi y tridimensional, etc.).
- Y por último el Post-proceso, que es la manera de visualizar los resultados.

A continuación se analiza cada proceso en detalle.

Pre-proceso

El Pre-proceso es la generación de entidades de dibujo de una geometría primitiva de la estructura. Esto significa, dibujar la estructura que se quiere estudiar y a su vez realizar una discretización suficiente de ella (generación de la malla).

Una vez realizada la discretización, ésta proporcionará todos los datos que sean necesarios para su posterior análisis: nodos, coordenadas de los nodos, elementos de la malla, así como la conectividad entre ellos.

Estos datos serán posteriormente interpretados por un programa de Elementos Finitos, junto con sus respectivos datos estructurales tales como: materiales, condiciones de contorno, etc.

Análisis

Dentro del cálculo numérico, las estructuras de barras se pueden expresar a través de un número limitado de ecuaciones como sería el caso del conocido cálculo matricial. Por desgracia, la mayoría de estructuras tienen un comportamiento continuo por lo que su representación partiendo de este número mínimo de estas ecuaciones obliga a simplificar notablemente el modelo con la consiguiente pérdida de exactitud de los resultados obtenidos.

Para poder realizar un análisis más aproximado de las estructuras se precisa la integración de las ecuaciones diferenciales de equilibrio de cada una de las partes que forman la estructura.

A pesar de que todas las estructuras continuas son tridimensionales existen algunos casos en los que se pueden describir sus comportamientos por medio de modelos unidimensionales (en el caso de las estructuras de barras), bidimensionales (elasticidad bidimensional, teoría de placas) o sólidos tridimensionales.

Actualmente el método de los Elementos Finitos es una de las herramientas más potentes para el cálculo de las estructuras de una, dos o tres dimensiones.

Post-proceso

Una vez realizado el análisis numérico de la estructura a estudiar, el siguiente paso es la interpretación de los resultados. Para ello, los programas comerciales más utilizados (SAP2000, GiD) permiten una visualización gráfica de los valores tensionales, esfuerzos y deformaciones.

2.2.2 Programas para el modelado numérico estructural

A continuación se explicarán los programas comerciales más comunes, el SAP2000 y el GiD.

SAP2000

Es un programa de análisis, elástico lineal y de segundo orden, de estructuras, por medio del método de los elementos finitos, que incluye un post-procesador gráfico para la presentación de resultados.

La preparación de datos para el desarrollo de un problema comprende:

- La descripción de la geometría estructural y de los materiales, así como sus condiciones de borde y datos generales.
- La definición de los estados de carga para los que la estructura precisa ser analizada.

El programa cuenta con un pre y post-proceso completos, además de implementar el cálculo sísmico.

GiD

Es un programa de interface gráfico, que incide en el pre y post-proceso y que se utiliza para definir, prepara e incluso visualizar todos los datos relacionados con la simulación numérica. Estos datos, permiten definir la geometría, los materiales, las condiciones de contorno y toda la información que se precise para la etapa posterior al cálculo. De la misma forma, el programa puede generar mallas de elementos finitos y definir toda la información de simulación numérica en un formato. También es posible, dentro del programa, ejecutar la simulación numérica y visualizar la información de los resultados.

2.3 Componentes principales

El análisis de componentes principales es una técnica estadística de síntesis de la información, o reducción de la dimensión (número de variables). Es decir, ante un banco de datos con muchas variables, el objetivo es reducirlas a un menor número perdiendo la menor cantidad de información posible (Terrádez, 2002).

Las nuevas componentes principales o factores serán una combinación lineal de las variables originales, y además serán independientes entre sí.

Un aspecto clave de este análisis es la interpretación de los factores, ya que ésta no viene dada a priori, sino que es deducida tras observar la relación de los factores con las variables iniciales (así pues, se debe estudiar tanto el signo como la magnitud de las correlaciones).

2.3.1 Fases del análisis de componentes principales

El análisis de componentes principales se divide en cinco fases que se describen a continuación.

Análisis de la matriz de correlaciones

Un análisis de componentes principales tiene sentido si existen altas correlaciones entre algunas de sus variables, ya que esto indica que existe información redundante y, por tanto, pocos factores explicarán gran parte de la variabilidad total.

Selección de los factores

La elección de los factores se realiza de tal forma que el primero recoja la mayor proporción posible de la variabilidad original; el segundo factor debe recoger la máxima variabilidad posible no recogida por el primero, y así sucesivamente. Del total de factores se elegirán aquellos que recojan el porcentaje de variabilidad que se considere suficiente. A éstos se les denominará componentes principales.

Análisis de la matriz factorial

Una vez seleccionados los componentes principales, se representan en forma de matriz. Cada elemento de ésta representa los coeficientes factoriales de las variables (las correlaciones entre las variables y los componentes principales). La matriz tendrá tantas columnas como componentes principales y tantas filas como variables.

Interpretación de los factores

Para que un factor sea fácilmente interpretable debe tener las siguientes características, que son difíciles de conseguir:

- Los coeficientes factoriales deben ser próximos a 1.
- Una variable debe tener coeficientes elevados sólo con un factor.
- No deben existir factores con coeficientes similares.

Cálculo de las puntuaciones factoriales

Son las puntuaciones que tienen los componentes principales para cada caso, que nos permitirán su representación gráfica.

Se calculan mediante la siguiente expresión (Terrádez, 2002):

$$X_{ij} = a_{i1} \cdot Z_{1j} + \dots + a_{ik} \cdot Z_{kj} = \sum_{s=1}^k a_{is} \cdot Z_{sk} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Los parámetros a son los coeficientes y los Z son los valores estandarizados que tienen las variables en cada uno de los elementos de la muestra.

2.4 Variabilidad frecuencial

En este apartado se explica los conceptos de vibración, frecuencia y otros de interés, la variación frecuencial y su escala de medida según Rodríguez (2005).

2.4.1 Vibración

La vibración es una oscilación mecánica en torno a una posición de referencia. Es la variación de la magnitud de una cantidad con respecto a una referencia específica cuando dicha magnitud se hace alternativamente más grande y más pequeña que la referencia.

La vibración es el resultado de fuerzas dinámicas en las máquinas o estructuras que tienen partes en movimiento o sometidas a acciones variables. Las diferentes partes de la máquina o estructura vibrarán con distintas frecuencias y amplitudes.

La vibración y el ruido, definido como sonidos no deseados, están estrechamente relacionados. El ruido es simplemente una parte de la energía de la vibración de una estructura que se transforma en variaciones de presión. La mayoría de los problemas de ruidos y vibraciones están relacionados con el fenómeno de la resonancia. Siempre va a existir algún nivel de ruido y de vibración en los procesos dinámicos.

A menudo, pequeñas vibraciones insignificantes pueden excitar las frecuencias de resonancia de otras partes de la estructura y pueden ser amplificadas a vibraciones mayores llegando a ser fuentes de ruidos.

El número de veces que tiene lugar el movimiento cíclico completo en un segundo se conoce como frecuencia, y se mide en hertzios (Hz). La frecuencia es igual a la inversa del período. Multiplicando la frecuencia por 2π , se obtiene la frecuencia angular, que es proporcional a la raíz cuadrada de la rigidez k dividida entre la masa m . Un aumento de la masa en un sistema que se encuentra vibrando produce un aumento del periodo, es decir, una disminución de la frecuencia. La amplitud de la vibración es la característica que describe la intensidad de la misma.

El valor de pico a pico indica la distancia entre el máximo y el mínimo valor alcanzados por la señal. Es un parámetro importante para aplicaciones en las que el desplazamiento vibratorio de una parte de la estructura es crítico para obtener las máximas tensiones o para consideraciones de rozamientos.

El valor de pico es el máximo que alcanza la curva, sin tener en cuenta el resto de la señal. Es particularmente útil para medir el nivel de golpes de corta duración.

El valor medio de la señal tiene en cuenta toda la señal.

El valor RMS es la medida más relevante de la amplitud porque tiene en cuenta la historia de la señal y proporciona un valor que está directamente relacionado con el contenido energético de la vibración, y por tanto con su capacidad destructiva.

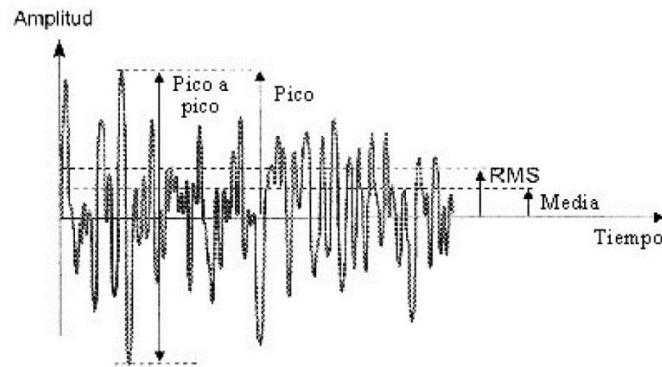


Figura 2.1. Señal aleatoria donde se representan: valor de pico a pico, valor de pico, RMS y media (Rodríguez, 2005).

2.4.2 Variación frecuencial

La vibración puede tener una sola componente con una sola frecuencia o muchas componentes a diferentes frecuencias actuando simultáneamente. En la práctica, las señales de vibración están formadas por muchas frecuencias. El proceso de descomponer las señales de vibración en sus componentes frecuenciales individuales se conoce como análisis de frecuencia.

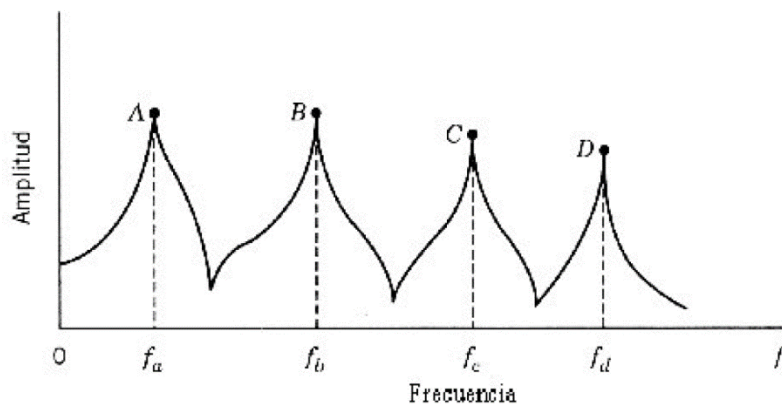


Figura 2.2. Espectro de frecuencias con cuatro picos (Rodríguez, 2005).

La Figura 2.2 es un espectrograma con cuatro picos mostrando el nivel de vibración en función de la frecuencia. Observando la amplitud de la aceleración en el dominio del tiempo de un punto no se ve cuántas componentes hay y a qué frecuencias se encuentran. Sin embargo, si se transforma al dominio de la frecuencia se obtiene el espectro de aceleraciones, que suele presentar ciertas características que muestran que la energía se concentra en torno a unas pocas frecuencias. El análisis en el dominio de la frecuencia puede proporcionar en muchos casos información detallada sobre las fuentes que producen la señal.

La función de respuesta en frecuencia (FRF) es la relación entre la salida (respuesta) y la entrada (excitación) de un sistema.

Las características modales de una estructura quedan definidas, en su régimen lineal, por sus frecuencias naturales, sus coeficientes de amortiguamiento y sus modos de vibración.

Las frecuencias naturales son aquellas que provocan que la estructura entre en resonancia. La resonancia significa amplificación, comparado con una carga estática de la misma magnitud, una carga oscilatoria puede producir respuestas uno o dos órdenes de magnitud mayores. Los valores de las frecuencias naturales están relacionados con los picos del espectro de aceleraciones.

Los modos de vibración son un conjunto de deformadas de la estructura que se está analizando, que coinciden con las deformadas que experimenta la estructura al ser excitada con cada frecuencia natural.

2.4.3 Escala de medida frecuencial

Los tres parámetros mecánicos de desplazamiento, velocidad y aceleración están íntimamente relacionados para un movimiento oscilatorio. Si la vibración contiene una sola frecuencia, la forma y el período de la señal es la misma para la velocidad, desplazamiento y aceleración, estando las principales diferencias en un desfase temporal entre estas tres curvas y en sus amplitudes.

En la medida de vibraciones se puede usar la escala logarítmica y la lineal. La escala a utilizar depende de los intereses a medir. La escala lineal para las frecuencias tiene la ventaja de que permite identificar fácilmente las componentes de la señal. Lo más simple es elegir una escala lineal con un rango que viene determinado por el rango de los datos adquiridos, pero a menudo esto no permite que otros datos importantes se vean claramente. Por ello, algunas veces, se usa la escala logarítmica que tiene la ventaja de poder cubrir un rango de frecuencias mucho más amplio.

Si las componentes de las frecuencias más interesantes son pequeñas en comparación con el rango de la medida realizada es muy útil la escala logarítmica para las frecuencias. Además comprime el efecto de las fluctuaciones aleatorias de la señal y las debidas al ruido. Al usar la escala logarítmica, las bajas frecuencias aparecen expandidas y las altas frecuencias comprimidas.

CAPÍTULO 3

3. MODELADO EXPERIMENTAL

En este capítulo se explican en detalle el modelo estructural (Figura 3.1), el sistema de medidas dinámicas utilizado en el laboratorio junto a la cámara térmica, los ensayos dinámicos aplicados a la estructura, el procesamiento de los datos obtenidos en los ensayos y el estudio de variabilidad frecuencial.



Figura 3.1. Estructura y mesa del laboratorio.

3.1 Modelo estructural

El modelo estructural tiene 1.7 m de altura, 1.44 m de longitud y 0.77 m de profundidad (Figura 3.2) y representa una maqueta de un posible edificio a escala 1:8.

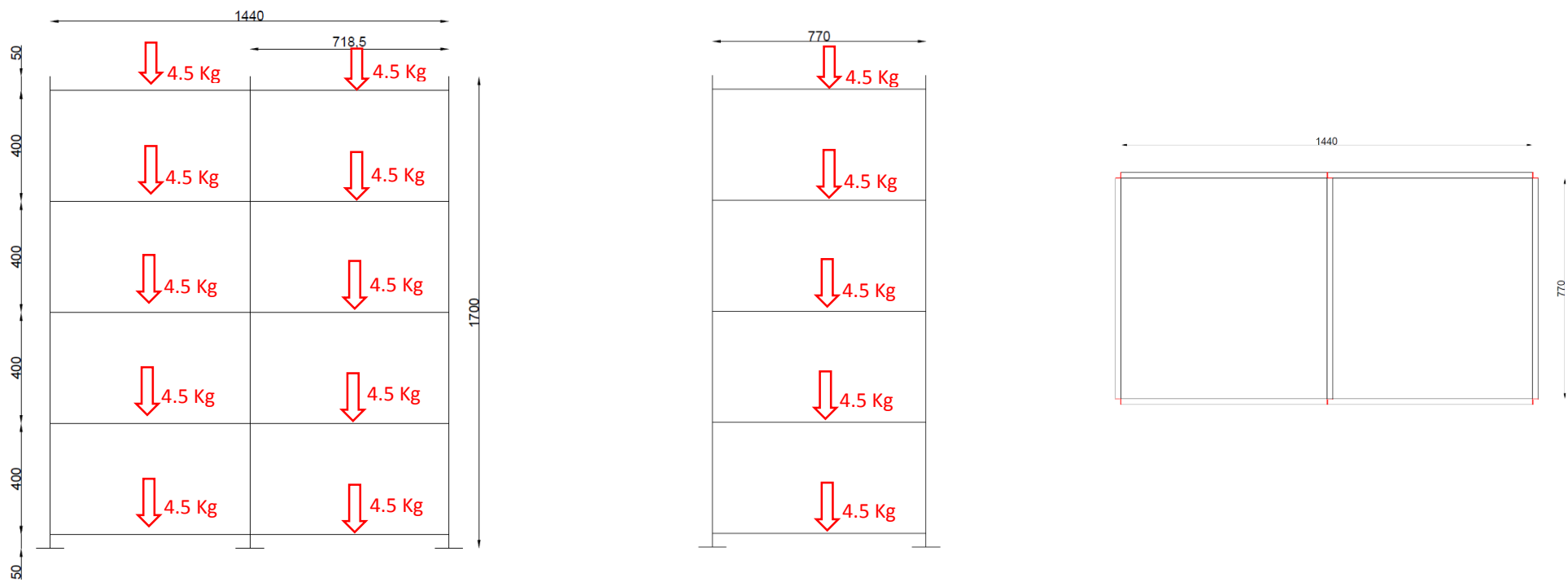


Figura 3.2. Vistas de la elevación longitudinal (izquierda), transversal (central) con las cargas añadidas y sección en planta de la estructura. Las unidades de la estructura están en milímetros.

En el centro de cada viga hay una carga permanente añadida de 4.5 Kg que simula el peso de la losa y las cargas muertas (Figura 3.2).

La estructura está unida a la mesa vibratoria (de 1.5x1.5m) mediante unas placas cuadradas de 12 cm de lado aproximadamente. Hay una placa por columna y cada una de ellas está fijada a la estructura de la mesa vibrante por 2 tornillos.

Las secciones de las vigas son rectangulares y las de las columnas son tipo L (Figura 3.3). Las uniones entre viga columna son articuladas mediante dos tornillos.

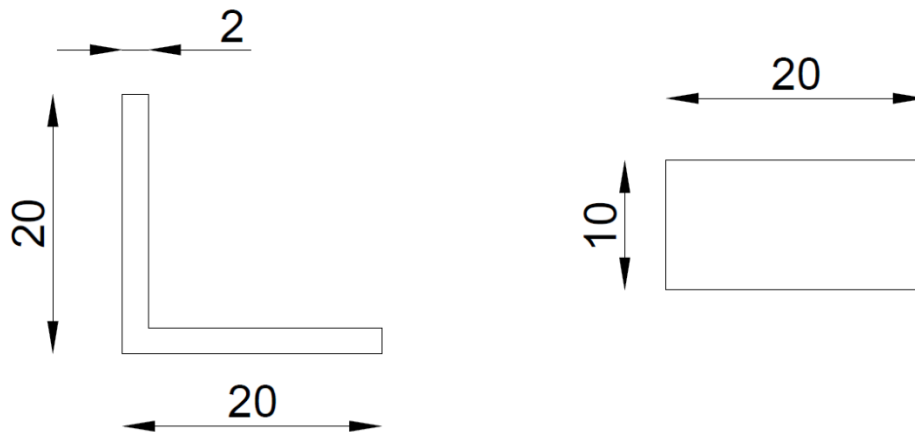


Figura 3.3. Vista de la sección de las columnas (izquierda) y las vigas (derecha). Las unidades están en milímetros.

3.2 Sistema de medidas dinámicas

El sistema de medición dinámica ha constado de acelerómetros, amplificadores y un grabador utilizados para el ensayo experimental de laboratorio.

3.2.1 Descripción general

En una de las dos secciones transversales de la estructura se colocaron 12 acelerómetros (Figura 3.4), dos en cada nodo de las distintas plantas, uno en dirección transversal y el otro en longitudinal. En la planta superior de la estructura hay 4 acelerómetros ya que se colocaron en los dos nodos de la sección.

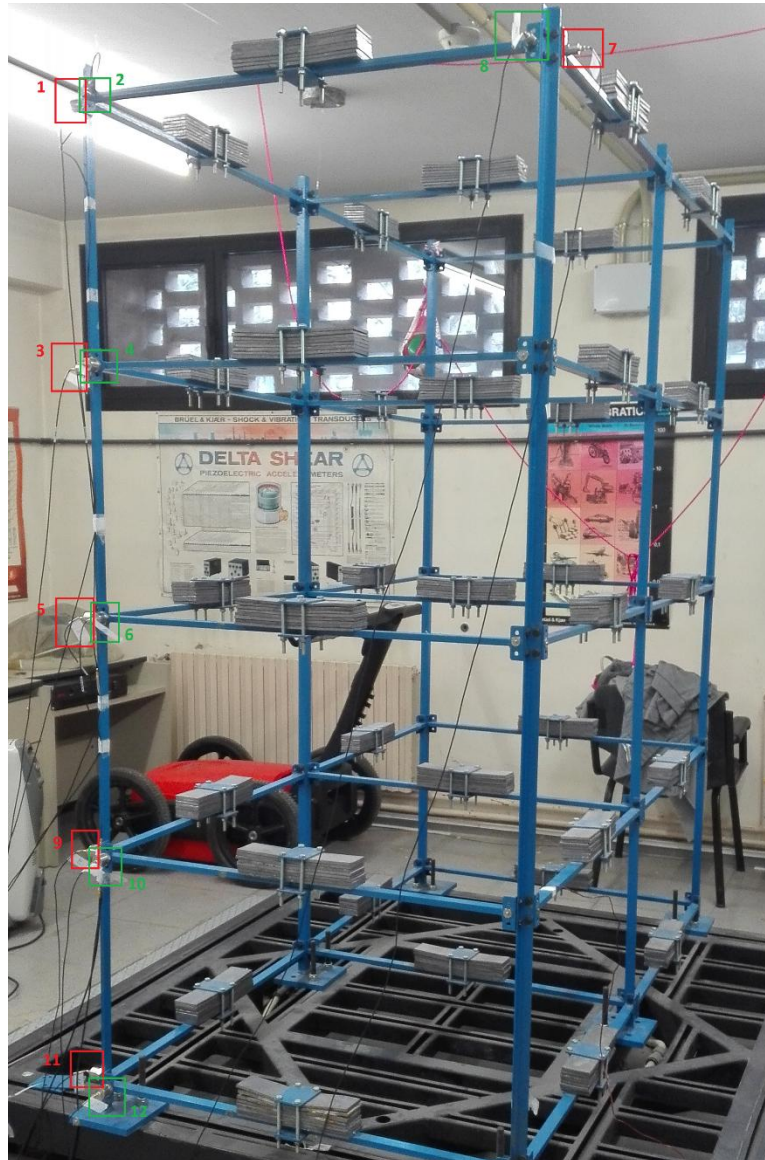


Figura 3.4. Fotografía de la estructura con los acelerómetros en la dirección transversal indicados en rojo y en verde para la dirección longitudinal. El número al lado de cada acelerómetro indica el canal de registro.

Cada acelerómetro se ha numerado (Figura 3.5) y va conectado mediante un cable de bajo ruido que evita interferencias eléctricas. 6 acelerómetros se conectaron a sendos amplificadores, mientras que los 6 restantes se conectaron a convertidores de carga a tensión. Los acelerómetros son de la marca Brüel & Kjaer y los modelos utilizados son 4370, 4371 y 4384.

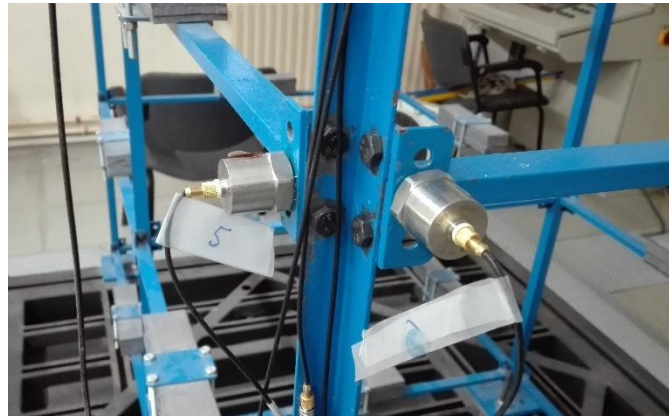


Figura 3.5. Dos acelerómetros de uno de los nodos de la estructura.

Hay 6 amplificadores (Figura 3.6) de la marca Brüel & Kjaer y el modelo es el 2635. Los convertidores de carga a tensión también son de la marca Brüel & Kjaer modelo 2647B.



Figura 3.6. Tres amplificadores con sus respectivas conexiones a los acelerómetros.

El grabador es un pulse notat de 12 canales (Figura 3.7), cada uno asignado como un canal. Es de la marca Brüel & Kjaer y el modelo es el 3053.



Figura 3.7. Grabador con las conexiones de los 12 acelerómetros.

3.2.2 Acelerómetros

Como se ha mencionado anteriormente, la estructura se ha monitorizado con 12 acelerómetros Bruël & Kjaer 9 de ellos son tipo 4370, 1 del tipo 4371 y 2 del tipo 4384.

Acelerómetro 4370

Es un acelerómetro piezoeléctrico de carga de bajas frecuencias y alta sensibilidad (Figura 3.8).



Figura 3.8. Acelerómetro piezoeléctrico modelo 4370 (Bruël & Kjaer, 2016).

Este modelo consta de 3 elementos piezoeléctricos y 3 masas sísmicas dispuestos de forma triangular alrededor de un eje central (Figura 3.9). Se mantienen en su lugar por un anillo de sujeción que aísla los elementos de la base. El anillo pretensa los elementos piezoeléctricos para dar una alta linealidad. Durante la vibración los elementos piezoeléctricos producen una carga que se recoge entre la carcasa y el anillo.

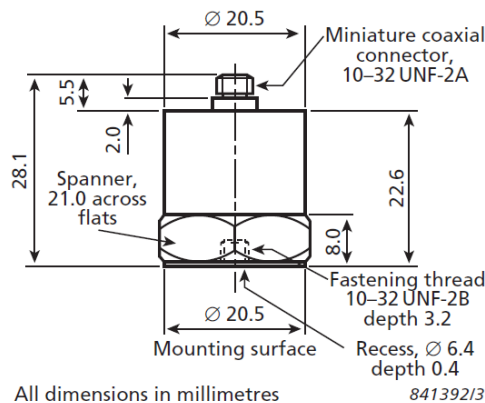


Figura 3.9. Esquema representativo del acelerómetro 4370 (Bruël & Kjaer, 2016).

La sensibilidad se calibra para un valor conveniente como 1, 3.16 o 31.6 pc/m/s².

Las principales características de este acelerómetro son:

- Alta sensibilidad de $98 \pm 2\%$ pC/g.
- Rango frecuencial de 0.1 a 4800 Hz (Figura 3.10).
- Ruido residual de 0.2 mm/s².
- Mínima resistencia de 20 GΩ.
- Trabaja en un rango de temperaturas de -74 a +250°C.

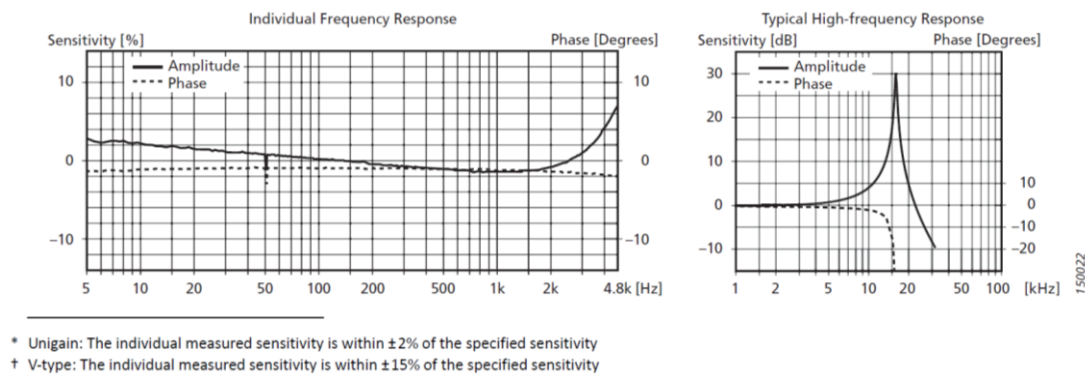


Figura 3.10. Curvas de respuesta frecuencial del acelerómetro 4370 (Bruël & Kjaer, 2016).

Se utiliza principalmente en pruebas y análisis de vibraciones y también en mediciones de bajas frecuencias de una estructura muy estable tanto en laboratorio como en campo.

Acelerómetro 4371

Es un acelerómetro piezoeléctrico de carga de altas frecuencias y alta sensibilidad (Figura 3.11).



Figura 3.11. Acelerómetro piezoeléctrico modelo 4371 (Bruël & Kjaer, 2016).

Este modelo consta de 3 elementos piezoeléctricos y 3 masas sísmicas dispuestos de forma triangular alrededor de un poste central (Figura 3.12). Se mantienen en su lugar por un anillo de sujeción que aísla los elementos de la base. El anillo pretensa los elementos piezoeléctricos para dar una alta linealidad. Durante la vibración, los elementos piezoeléctricos producen una carga que se recoge entre la carcasa y el anillo.

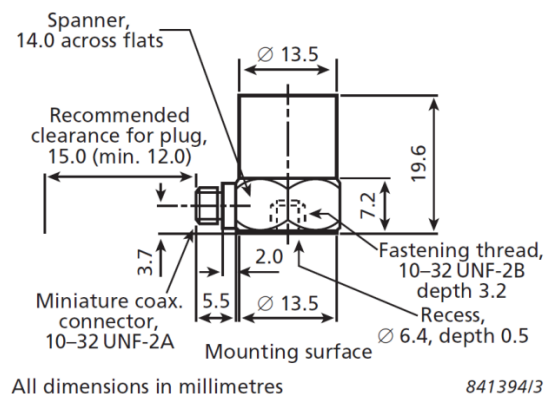


Figura 3.12. Esquema representativo del acelerómetro 4371 (Bruël & Kjaer, 2016).

La sensibilidad se calibra para un valor conveniente como 1, 3.16 o 31.6 pc/m/s².

Las principales características de este acelerómetro son:

- Alta sensibilidad de $9.8 \pm 2\%$ pC/g.
- Rango frecuencial de 0.1 a 12600 Hz (Figura 3.13).
- Ruido residual de 2.4 mm/s^2 .
- Mínima resistencia de $20 \text{ G}\Omega$.
- Trabaja en un rango de temperaturas de -74 a $+250^\circ\text{C}$.

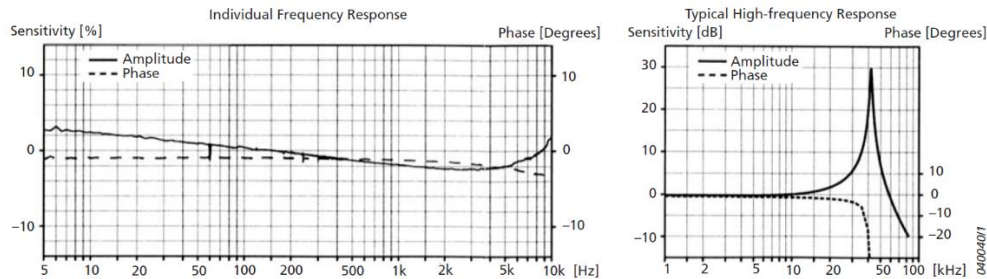


Figura 3.13. Curvas de respuesta frecuencial del acelerómetro 4371 (Bruël & Kjaer, 2016).

Se utiliza principalmente en pruebas y análisis de vibraciones y también en mediciones de altas frecuencias de una estructura muy estable tanto en laboratorio como en campo.

Acelerómetro 4384

Es un acelerómetro piezoeléctrico de carga de altas frecuencias y alta sensibilidad (Figura 3.14).



Figura 3.14. Acelerómetro piezoeléctrico modelo 4384 (Bruël & Kjaer, 2016).

Este modelo consta de 3 elementos piezoeléctricos y 3 masas sísmicas dispuestos de forma triangular alrededor de un poste central (Figura 3.15). Se mantienen en su lugar por un anillo de sujeción que aísla los elementos de la base. El anillo pretensa los elementos piezoeléctricos para dar una alta linealidad. Durante la vibración, los elementos piezoeléctricos producen una carga que se recoge entre la carcasa y el anillo.

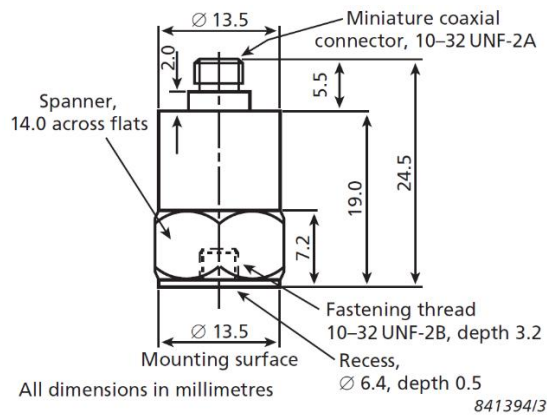


Figura 3.15. Esquema representativo del acelerómetro 4384 (Bruël & Kjaer, 2016).

La sensibilidad se calibra para un valor conveniente como 1, 3.16 o 31.6 $\mu\text{C}/\text{m}/\text{s}^2$.

Las principales características de este acelerómetro son:

- Alta sensibilidad de $9.8 \pm 2\%$ $\mu\text{C}/\text{g}$.
- Rango frecuencial de 0.1 a 12600 Hz (Figura 3.16).
- Ruido residual de $2.4 \text{ mm}/\text{s}^2$.
- Mínima resistencia de $20 \text{ G}\Omega$.
- Trabaja en un rango de temperaturas de -74 a $+250^\circ\text{C}$.

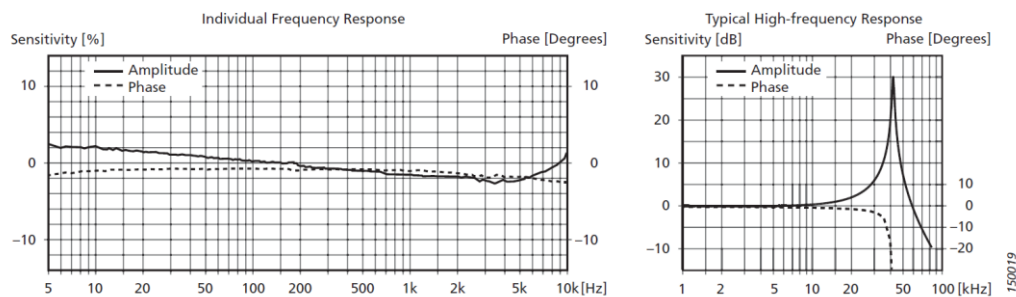


Figura 3.16. Curvas de respuesta frecuencial del acelerómetro 4384 (Bruël & Kjaer, 2016).

Se utiliza principalmente en pruebas y análisis de vibraciones y también en mediciones de altas frecuencias de una estructura muy estable tanto en laboratorio como en campo.

3.2.3 Acondicionador

En el laboratorio se ha trabajado con 6 acondicionadores modelo 2635 de la marca Bruël & Kjaer (Figura 3.17).



Figura 3.17. Amplificador modelo 2635 (Bruël & Kjaer, 2016).

Es un acondicionador de cuatro etapas que consiste en:

- Amplificador de entrada
- Amplificador-filtro de pasa baja.
- Un amplificador integrador.
- Amplificador de salida.

También tiene incluidos un detector de sobrecarga, un oscilador de prueba y la unidad de la fuente de alimentación (Figura 3.18).

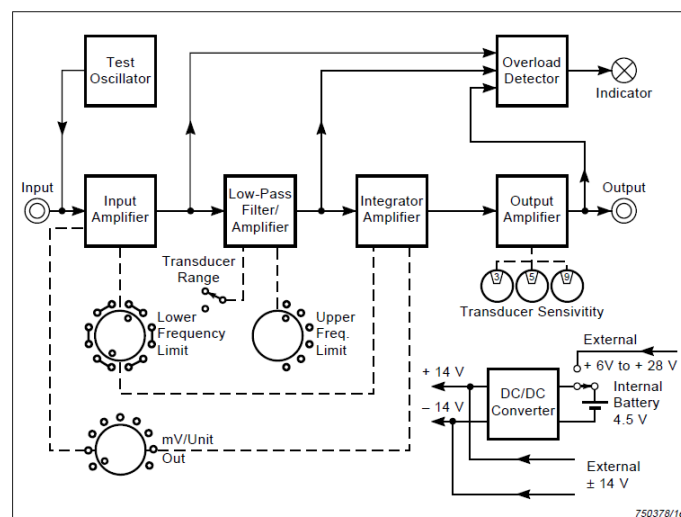


Figura 3.18. Diagrama en bloque del amplificador 2635 (Bruël & Kjaer, 2016).

Características

- Entrada de carga.
- Condición de 3 dígitos para la sensibilidad del transductor.
- Grados de salida unificados para simplificar la calibración del sistema.
- Alta sensibilidad.
- Integradores incorporados para el desplazamiento y la velocidad.

- Límites de altas y bajas frecuencias conmutables.
- Prueba del oscilador incorporado.

Especificaciones

- Sensibilidad de 0.1 a 10.99 pC/ms⁻².
- Aceleración de 0.1 mV a 1 V/ms⁻².
- Velocidad de 10 mV a 100 V/ms⁻¹.
- Desplazamiento de 0.1 mV a 10 V/mm.
- Impedancia de < 1 Ω.
- Rango frecuencial: aceleración de 0.2 o 2 Hz hasta 100 kHz.
- Filtro pasa baja: límites de 100 Hz, 1 kHz, 3 kHz, 10 kHz, 30 kHz y >100 kHz con atenuación (Figura 3.19).

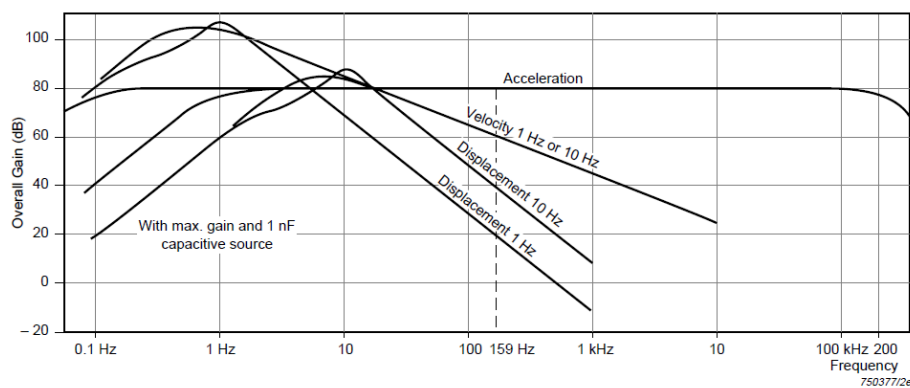


Figura 3.19. Curvas de respuesta frecuencial en posición lineal (aceleración) y con integradores para la velocidad y el desplazamiento. Los filtros pasa baja no se muestran (Bruël & Kjaer, 2016).

Usos

- Medidas de vibración en laboratorio y campo, en términos de aceleración, velocidad y desplazamiento juntos con un acelerómetro piezoeléctrico y un voltímetro.
- Grabación en campo de la vibración y otras señales junto con grabadoras portátiles.
- Mediciones de sonido bajo el agua con hidrófonos.
- Mediciones de impedancia mecánica.

3.2.4 Grabador

El grabador utilizado en laboratorio y que va conectado a los 12 acelerómetros de la estructura es de la marca Bruël & Kjaer modelo 3053 (Figura 3.20).



Figura 3.20. Grabador/registrador modelo 3053 (Bruël & Kjaer, 2016).

Es un sistema de hardware modular que funciona mediante Ethernet y conectores y usa el Protocolo de Tiempo Preciso para sincronizar los relojes de los componentes del sistema.

Este grabador/registrador se puede utilizar como un solo módulo autónomo, como parte de un módulo de configuración distribuida o recogidos en redes de varios módulos. Tiene un diseño muy resistente que permite el trabajo en campo. Se pueden colocar los módulos cerca del objeto de medición. La transferencia de datos es ilimitada.

El Protocolo de Tiempo Preciso para la sincronización de los relojes tiene una precisión de sub-microsegundo. Con Ethernet se minimizan el número de cables, menos tiempo de inactividad, un mantenimiento más sencillo y mayor rapidez de instalación. Todas las conexiones externas están aisladas galvánicamente, de forma que elimina el ruido del circuito de tierra de forma óptima.

El rango dinámico es de 130 dB, sus rangos frecuenciales son de 25.6, 51.2, 102.4 o 204.8 kHz. Tiene un detector de sobrecarga del generador y un indicador de defectos de los conectores. El filtro es anti-aliasing Butterworth de 3r orden. Funciona con temperaturas de hasta 80°C, por tanto, siempre que la temperatura esté dentro de los límites de seguridad, se asegura una operación silenciosa. Es resistente, ligero (750 g) y fundido en magnesio.

Se utiliza principalmente para:

- Adquisición de datos a tiempo real.
- Medición en laboratorio y campo,
- Identificación de fuentes de ruido mediante una matriz acústica.
- Análisis modal.
- Formación de haz de alta frecuencia y otras medidas de sonido y vibración de altas frecuencias.

3.3 Cámara térmica

Uno de los aspectos importantes de esta tesina es el control de la temperatura ambiente y de la estructura para poder estudiar el comportamiento de ésta frente a distintas temperaturas y a distintos daños aplicados.

Para saber la temperatura de la estructura en cada uno de los ensayos se ha utilizado una cámara fotográfica térmica.

La cámara térmica utilizada en el laboratorio es la Thermo GEAR G100EX Series de la marca InfraRed Camera (Figura 3.21). Tiene un rango de medición de la temperatura de -40 hasta 1500 °C, una resolución de la temperatura de 0.04 °C, un rango espectral de 8 a 14 μm y una resolución de cámara de 2M píxels.



Figura 3.21. Cámara Thermo GEAR G100EX (Nippon Avionics Co., LTD., 2016).

En el laboratorio siempre se han hecho las fotografías (Figura 3.22) desde la misma distancia respecto a la estructura (3 metros), y con la cámara encima de un trípode a una altura de 1.5 m aproximadamente.

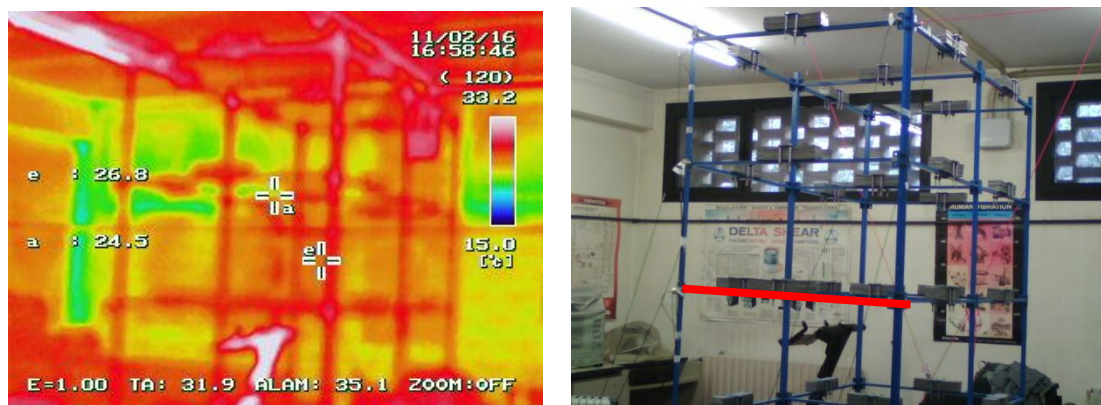


Figura 3.22. Imagen térmica con indicación del rango de la temperatura a la izquierda, e imagen de la estructura a la derecha.

Cuando se hace una fotografía con la cámara térmica el resultado son dos imágenes, una fotografía y una imagen térmica. Ésta última refleja el rango de temperaturas de toda el área que se fotografía.

Una vez hecha la imagen térmica para obtener la temperatura en un punto o una línea concreta se carga la imagen en el software InfReC Analyzer NS9500 Lite y con la opción de señalar mediante un punto, línea, área, etc. en la imagen, se obtiene la temperatura media del área o sección seleccionada.

En este caso la temperatura de la estructura es la media de los valores de temperatura de la tercera viga central transversal seleccionada en la Figura 3.22 como una línea en rojo.

Estos valores obtenidos se han utilizado para el estudio de del análisis de la variación de las frecuencias modales con la temperatura.

Las imágenes térmicas de los ensayos utilizadas para el estudio se encuentran en el Anexo B.

3.4. Ensayos dinámicos del modelo

En la estructura se han efectuado dos tipos de ensayos. En uno se ha realizado un análisis modal operacional para la obtención del comportamiento dinámico de la estructura y así ajustar el modelo numérico. El otro tipo de ensayo ha consistido en la variación de las frecuencias modales frente a cambios de temperatura de la estructura.

Los ensayos de laboratorio han consistido en golpear con una pelota medicinal de 2 Kg en el centro de una de las secciones transversales de la mesa vibratoria (Figura 3.23). Para cada ensayo se han dado 10 golpes, esperando un minuto entre cada golpe.

La pelota se ha golpeado desde una altura de 48 cm, a una distancia de 50 cm de la mesa. El golpe ha consistido en dejar caer la pelota medicinal. Por tanto, la fuerza de golpeo es de 9.408 N*m.

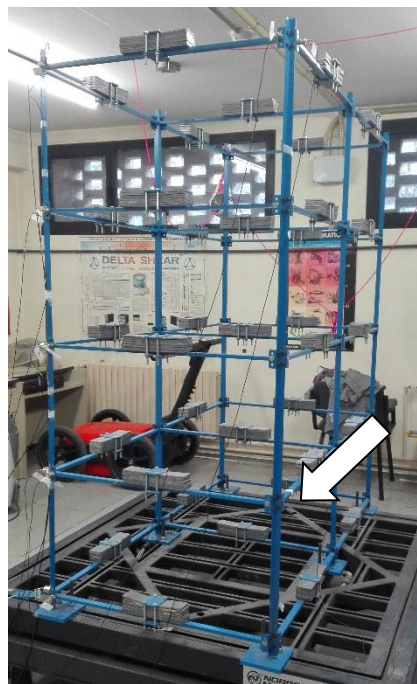


Figura 3.23. Estructura y mesa vibratoria. La flecha blanca indica el lugar donde se ha golpeado con la pelota.

3.4.1 Ensayos del análisis modal operacional

En el ensayo del análisis modal operacional, primero se han situado los 12 acelerómetros en la misma posición que en los ensayos de variación de frecuencias modales con la temperatura (test en posición normal). En segundo lugar, a la misma temperatura ambiente (24 °C) se ha realizado otro ensayo con los sensores de todas las plantas en el nodo simétrico al anterior, exceptuando

la planta superior (test en posición inversa). Los sensores en la planta superior no se han movido para así utilizarlos como referencia en los dos test.

3.4.2 Ensayos de la variación de las frecuencias modales con la temperatura

Para los ensayos de la variación de las frecuencias modales con la temperatura se situaron los acelerómetros en su posición normal y mediante sistemas de calefacción y refrigeración se varió la temperatura. Las temperaturas conseguidas fueron entre 30 y 15º centígrados.

Antes de realizar cada ensayo se ha hecho una fotografía con la cámara térmica para, posteriormente, saber la temperatura de la estructura. Ésta es la que se tiene en cuenta a la hora de procesar los datos.

Estos ensayos se han realizado para diferentes daños aplicados a la primera planta de la estructura.

Los daños aplicados han sido:

- En una viga de un nodo, en la sección transversal opuesta a la del golpe (Figura 3.24).



Figura 3.24. Fotografía de la estructura en la que se ha señalado en rojo el lugar del daño aplicado.

Se han aflojado los dos tornillos para que no haya par de apriete, aun así la viga sigue unida a la columna.

- En la otra viga del mismo nodo anterior (Figura 3.25).



Figura 3.25. Fotografía de la estructura en la que se ha señalado en rojo el lugar del daño aplicado.

Se han aflojado los dos tornillos para que no haya par de apriete, aun así la viga sigue unida a la columna.

- Daño en las dos vigas del mismo nodo anterior (Figura 3.26).



Figura 3.26. Fotografía de la estructura en la que se han señalado en rojo los lugares del daño aplicado.

Se han aflojado los cuatro tornillos para que no haya par de apriete, aun así las vigas siguen unidas a la columna.

- *Daño generalizado en toda la planta* (Figura 3.27).



Imagen 3.27. Fotografía de la estructura en la que se han señalado en rojo los lugares del daño aplicado.

Se han aflojado los cuatro tornillos de cada nodo de la planta a su mitad del par de apriete.

Finalmente también se han hecho los ensayos sin daño aplicado a la estructura para cada grado de temperatura.

3.5 Procesado de los datos

Los datos de todos los ensayos, obtenidos por los acelerómetros, son archivos con extensión *.uff* que tienen valores de aceleración y tiempo (Figura 3.28).

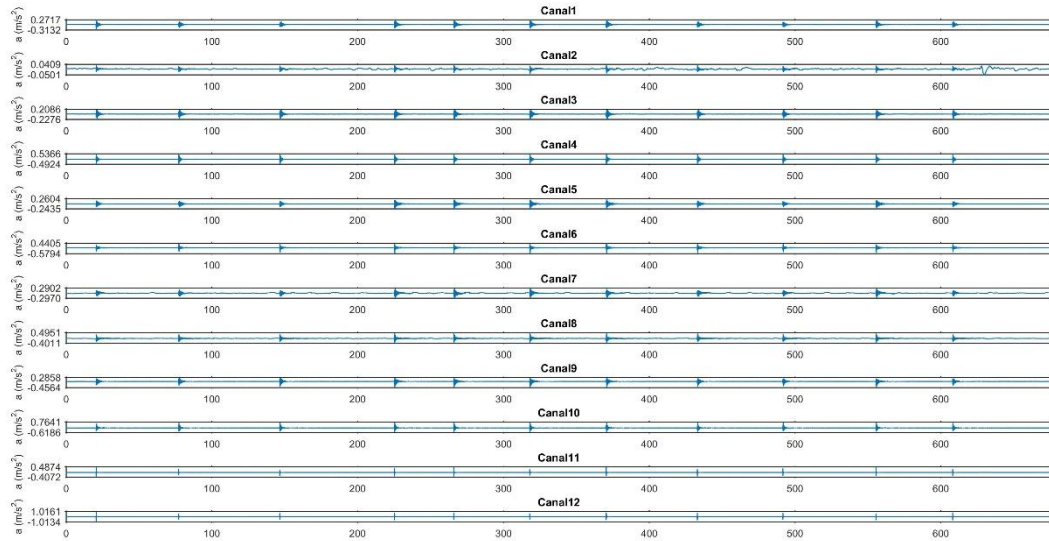


Figura 3.28. Acelerogramas de los 12 canales (acelerómetros) del ensayo sin daño aplicado a 24 grados de temperatura.

Mediante el programa Matlab se han tratado estos archivos de datos para obtener:

- Las densidades de energía espectral promediados (Figura 3.29) utilizando ventanas rectangulares, en la gran mayoría de casos el inicio y final es prácticamente igual a 0. Para los casos que con las ventanas rectangulares ha habido aliasing se ha utilizado la ventana de Hanning para eliminar este efecto.
- La coherencia de cada modo (Figura 3.29).
- La fase de los espectros cruzados en valores promediados (Figura 3.29).

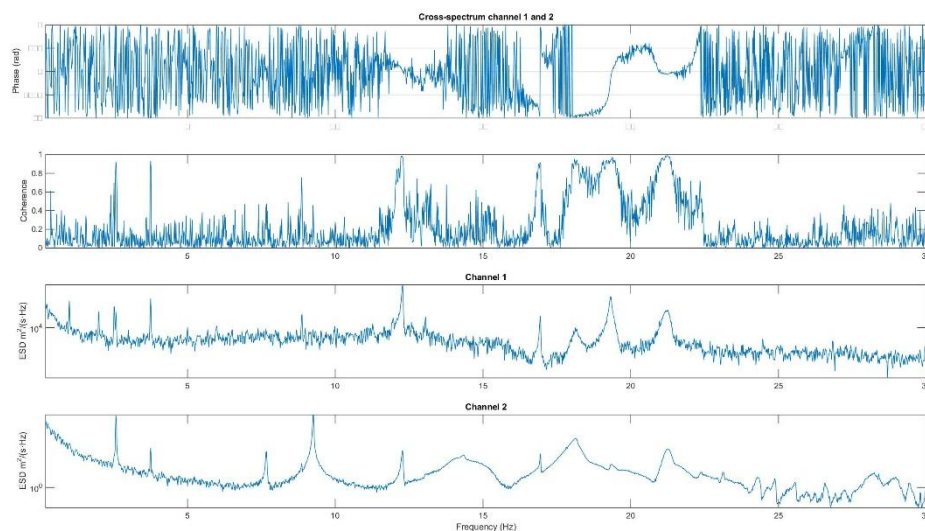


Figura 3.29. Fase del espectro cruzado (Superior), coherencia (segunda) y densidades de energía espectral de los canales 1 y 2 (inferiores) del ensayo sin daño aplicado a 18 grados.

El inicio de cada ventana rectangular se ha determinado en el gráfico (Figura 3.28) de forma manual para cada ensayo, así cada sacudida está aislada en una ventana de 69 segundos de duración.

Para la realización del análisis modal operacional se necesitan las amplitudes espectrales, la fase del espectro cruzado y la coherencia entre todos los canales simultáneos de los ensayos sin daño a temperatura ambiente (24°C). Estos datos han sido calculados con el programa Matlab por separado para los dos tipos de test. En estos dos tipos de test no se ha obtenido la misma energía espectral exactamente, por tanto las densidades de energía espectral del test normal se han normalizado con las densidades de energía espectral de los acelerómetros comunes a los dos test (sensores 1, 2, 7 y 8).

El cálculo (Ecuación 3.1) que se ha realizado para obtener la amplitud normalizada (por ejemplo, respecto al canal 1) es el siguiente:

$$Amplitud\ normalizada_1 = \frac{Amplitud_1(posición\ inversa) * Amplitud_1(posición\ normal)}{Amplitud_1(posición\ inversa)} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Para los valores de las amplitudes de los canales de posición fija (1, 2, 7 y 8) se han escogido las amplitudes de la posición inversa. Para los canales del test con los sensores en posición normal se ha utilizado la amplitud normalizada, mientras que para los canales del test con los sensores en posición inversa se ha utilizado la amplitud directamente medida.

En cada par de canales (puntos de medición) se ha dibujado la dirección de cada modo de vibración considerando las densidades de energía espectral y las fases de sus espectros cruzados. En todos los modos de vibración que el canal 2 ha presentado densidad de energía espectral, se ha supuesto que este canal tiene sentido positivo para comparar el sentido entre pares de canales, y los demás se han calculado considerando la fase del espectro cruzado con este. En los modos en que el canal 2 no ha presentado densidad de energía espectral se ha escogido como sentido positivo el canal 1.

Para realizar el ensayo de la variación de la frecuencia con la temperatura únicamente se necesita el valor de las frecuencias modales para cada daño y temperatura. Aunque solo se requiere el autoespectro de un canal que presente todos los modos de vibración, se han procesado con Matlab los cuatro canales superiores, midiéndose los otros por seguridad y posibles estudios posteriores. La selección de la frecuencia de cada modo se ha efectuado mediante Peak Picking.

Los espectros utilizados en el ensayo se encuentran en el Anexo A.

3.6 Variabilidad Frecuencial

Uno de los estudios que se ha realizado con los datos del ensayo de laboratorio ha sido la obtención de los modos de cada uno de ellos en cada daño aplicado y a diferentes temperaturas.

Mediante el programa Excel se ha efectuado una tabla para cada daño aplicado, indicando las temperaturas de los ensayos y, a cada una de ellas, todos los modos. Éstos se han obtenido de los espectros de frecuencia-amplitud espectral procesados en Matlab.

Mediante estos datos se ha hecho un estudio de componentes principales en el software SPSS, que es un programa de análisis estadístico.

Antes de introducir los datos en el programa se han eliminado las frecuencias constantes, es decir, las frecuencias que en el tiempo varían menos de $2\Delta f$ (Δf : resolución frecuencial de las densidades de energía espectral). Esto se hace para eliminar el ruido de los datos que experimentalmente no han variado entre las distintas temperaturas.

Una vez introducidos los datos se introducen las condiciones de cálculo para hacer el estudio estadístico. Las condiciones son las siguientes:

- Correlaciones entre los datos.
- Extracción mediante métodos de componentes principales.
- Número de 20 factores.
- Número de 50 iteraciones.
- Rotación en ejes claros.

Los resultados que se obtienen y que interesan para esta tesina son:

- El porcentaje de la varianza.
- El porcentaje de la varianza acumulada para cada componente.

Éstos nos da idea de cuántas componentes principales hay en cada tipo de ensayo (sin daño, daño generalizado, etc.).

Los resultados se muestran en el Capítulo 4.

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados del análisis modal operacional, el proceso y resultado del modelado numérico y los resultados de la variabilidad frecuencial y del análisis de componentes principales

4.1 Análisis modal

En las tablas 4.1 a 4.10 se presentan los valores de amplitud espectral, coherencia y la fase de los espectros cruzados promedios para los primeros 10 modos de vibración de la estructura, sin ningún daño aplicado y a temperatura ambiente (24°C). En Color amarillo los valores espectrales medidos, en naranja los valores normalizados para cada uno de los canales fijos y en rojo los valores espectrales seleccionados.

Mediante los valores de las tablas se ha dibujado con el programa Autocad la estructura en planta. De cada modo se ha dibujado la deformación (dirección, sentido y desplazamiento relativo) en cada planta a partir de las amplitudes medidas por cada acelerómetro y de las amplitudes normalizadas.

En las figuras presentadas a continuación (Figuras de la 4.1 a la 4.10) con la deformación en cada planta, las líneas de color rojo representan el sentido y dirección del movimiento y su longitud representa el desplazamiento relativo. La planta más alta (planta 5) es la que tiene más vibración, en general, y en la planta baja (planta 1) prácticamente no se aprecia movimiento.

- Modo 1: 2.516

POSICIÓN INVERSA					POSICIÓN NORMAL						
Canales	Amplitud (m2/(s*Hz))	Fase (rad)	Fase (°)	Coherencia (0-1)	Canales	Amplitud (m2/(s*Hz))	Amplitud norm. 1	Amplitud norm. 7	Fase (rad)	Fase (°)	Coherencia (0-1)
1	53370	-	-	-	1	115100	53370	49896,2701	-	-	-
2	0	-	-	-	2	0	0	0	-	-	-
3	37620	3,135	179,622	0,9995	3	87360	40507,4127	37870,8788	0,006298	0,3608	0,9997
4	0	-	-	-	4	0	0	0	-	-	-
5	18220	3,139	179,8514	0,9989	5	40570	18811,6499	17587,2431	-0,002529	-0,1449	0,9993
6	0	-	-	-	6	0	0	0	-	-	-
7	59390	-3,12	-178,7628	0,9987	7	137000	63524,6742	59390	3,138	179,7941	0,9993
8	0	-	-	-	8	0	0	0	-	-	-
9	3824	-3,129	-179,2785	0,9986	9	7880	3653,82738	3416,00876	-0,2434	-13,9457	0,9926
10	0	-	-	-	10	0	0	0	-	-	-
11	25,2	3,124	178,99	0,979	11	46,64	21,6262103	20,2186102	-0,5702	-32,67	0,959
12	0	-	-	-	12	0	0	0	-	-	-

Tabla 4.1. Valores de amplitud, fase y coherencia de todos los canales del ensayo sin daño aplicado a temperatura ambiente para el modo 2.516.

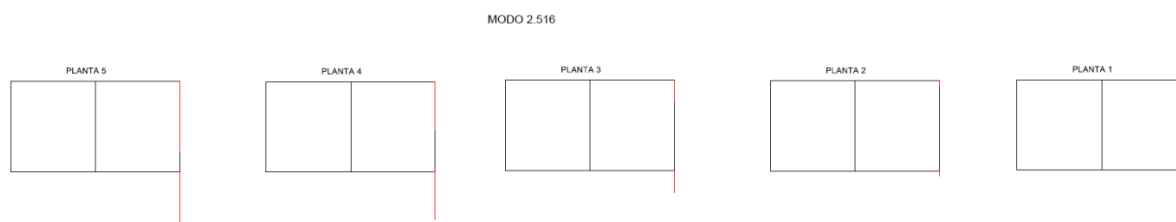


Figura 4.1. Forma modal del modo 1.

El primer modo es una flexión transversal. Todas las plantas se mueven en el mismo sentido y dirección.

- **Modo 2: 2.578**

POSICIÓN INVERSA					POSICIÓN NORMAL								
Canales	Amplitud (m2/(s*Hz))	Fase (rad)	Fase (º)	Coherencia (0-1)	Canales	Amplitud (m2/(s*Hz))	Amplitud norm. 1	Amplitud norm. 2	Amplitud norm. 7	Amplitud norm. 8	Fase (rad)	Fase (º)	Coherencia (0-1)
1	30230	3,132	179,4503	0,9976	1	41200	30230	24286,1757	31825,0457	59055,0929	3,106	177,9606	0,9892
2	182500				2	309600	227165,243	182500	239151,314	443773,222			
3	18610	0,0132	0,7563	0,9982	3	24150	17719,7694	14235,7074	18654,7294	34616,0314	3,138	179,7941	0,9854
4	1278000	-0,004932	-0,2825	0,999	4	2066000	1515902,43	1217845,61	1595887	2961354,9	-0,002371	-0,1358	0,9995
5	8473	0,0101	0,5786	0,9975	5	14880	10918,0194	8771,31783	11494,0942	21328,6355	-2,975	-170,4549	0,9922
6	624700	-0,004233	0,2425	0,9991	6	996800	731389,903	587583,979	769980,717	1428789,24	0,001394	0,0798	0,9996
7	54960	0,0634	3,6325	0,9985	7	71150	52205,449	41940,8107	54960	101984,705	0,07674	4,3968	0,9881
8	4475000	0,1055	6,0447	0,9979	8	3122000	2290729,61	1840326,23	2411596,91	4475000	0,01204	0,6898	0,9995
9	1264	0,08268	4,7372	0,9859	9	827,7	607,31483	487,904554	639,358988	1186,40535	-2,739	-156,9331	0,9758
10	138700	0,005724	0,3279	0,999	10	205900	151076,626	121371,932	159047,983	295132,127	0,008971	0,514	0,9995
11	25,2	-1,802	-103,2469	0,3567	11	387,2	284,103301	228,242894	299,093633	555,003203	1,537	88,0636	0,9631
12	2294	-0,01214	-0,6955	0,9976	12	1597	1171,77937	941,384044	1233,60675	2289,10154	0,1398	8,0099	0,999

Tabla 4.2. Valores de amplitud, fase y coherencia de todos los canales del ensayo sin daño aplicado a temperatura ambiente para el modo 2.578.

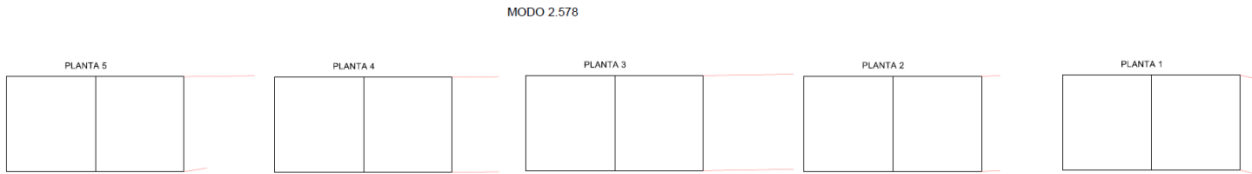


Figura 4.2. Forma modal del modo 2.

La estructura oscila debido a que todas las plantas se mueven en el mismo sentido y dirección. El movimiento parece una flexión longitudinal aunque el punto donde se sitúa el sensor 2 presenta una amplitud anormalmente pequeña en los dos test (normal e inverso).

- **Modo 3: 3.734**

POSICIÓN INVERSA					POSICIÓN NORMAL								
Canales	Amplitud (m2/(s*Hz))	Fase (rad)	Fase (º)	Coherencia (0-1)	Canales	Amplitud (m2/(s*Hz))	Amplitud norm. 1	Amplitud norm. 2	Amplitud norm. 7	Amplitud norm. 8	Fase (rad)	Fase (º)	Coherencia (0-1)
1	75070	3,133	179,5076	0,9689	1	180900	75070	91806,5505	52210,0764	65396,6395	3,118	178,6482	0,9824
2	2301				2	4534	1881,52228	2301	1308,57096	1639,07332			
3	52490	0,01107	0,6342	0,9691	3	135700	56312,8745	68867,6004	39164,7726	49056,5173	-3,12	-178,7628	0,9824
4	9929	-3,12	-178,7628	0,9712	4	29290	12154,7833	14864,6427	8453,4723	10588,5438	-0,004591	-0,263	0,983
5	26060	0,008508	0,4874	0,9719	5	62860	26085,6838	31901,3807	18142,2079	22724,3381	-3,112	-178,3044	0,9824
6	5170	-3,131	-179,393	0,9683	6	12920	5361,55003	6556,88575	3728,87887	4670,6721	-0,001703	-0,0975	0,9828
7	75530	0,4312	24,7059	0,9665	7	261700	108600,437	132812,461	75530	94606,4155	0,0558	3,1971	0,9808
8	17750	3,114	178,419	0,9693	8	49100	20375,55	24918,1959	14170,8942	17750	-1,583	-90,6992	0,9688
9	5081	0,00792	0,4537	0,9697	9	10480	4348,99724	5318,58844	3024,66335	3788,5947	-3,118	-178,6482	0,982
10	1175	-3,127	-179,1639	0,9695	10	2276	944,495965	1155,06749	656,882996	822,790224	0,02306	1,3212	0,9824
11	33,38	0,04202	2,4075	0,9516	11	47,19	19,582937	23,948873	13,6196435	17,0595214	-3,102	-177,7315	0,9596
12	22,55	3,123	178,9347	0,93	12	18,1	7,51114981	9,18573004	5,22389377	6,54327902	0,1396	7,9984	0,8827

Tabla 4.3. Valores de amplitud, fase y coherencia de todos los canales del ensayo sin daño aplicado a temperatura ambiente para el modo 3.734.

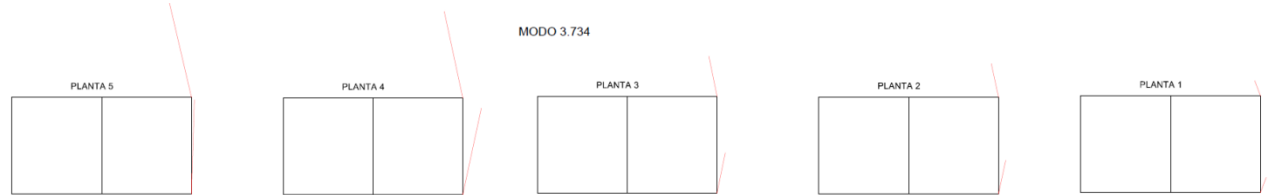


Figura 4.3. Forma modal del modo 3.

El tercer modo la estructura es una torsión. El centro de la torsión parece cercano al centro geométrico de la estructura.

- **Modo 4: 7.641**

POSICIÓN INVERSA					POSICIÓN NORMAL								
Canales	Amplitud (m2/(s*Hz))	Fase (rad)	Fase (°)	Coherencia (0-1)	Canales	Amplitud (m2/(s*Hz))	Amplitud norm. 1	Amplitud norm. 2	Amplitud norm. 7	Amplitud norm. 8	Fase (rad)	Fase (°)	Coherencia (0-1)
1	6388	-0,004915	-0,2816	0,996	1	4465	6388	5175,93204	6005,37839	5727,99184	0,0934	5,3514	0,9894
2	1791				2	1545	2210,40538	1791	2078,00887	1982,02629			
3	4633	-3,134	-179,5649	0,9965	3	3338	4775,62016	3869,48738	4489,57516	4282,20308	-0,0898	-5,1451	0,9916
4	11900	-3,132	-179,4503	0,9967	4	8545	12225,187	9905,56311	11492,9358	10962,0807	-0,05724	-3,2796	0,9926
5	2003	-3,135	-179,6222	0,9965	5	1663	2379,22598	1927,78835	2236,71764	2133,40435	-0,07367	-4,2209	0,9925
6	6272	3,138	179,7941	0,9973	6	3629	5191,94894	4206,82136	4880,96712	4655,51677	-0,1714	-9,8204	0,9777
7	7731	-3,116	-178,5336	0,9951	7	5748	8223,56641	6663,21553	7731	7373,90752	2,994	171,5435	0,9844
8	14150	-3,128	-179,2212	0,9907	8	11030	15780,4345	12786,233	14835,2349	14150	2,965	169,8819	0,9853
9	348,1	3,139	179,8514	0,9949	9	372,4	532,786383	431,694757	500,874113	477,738894	0,001894	0,1085	0,9879
10	1449	3,136	179,6795	0,9977	10	644,5	922,075252	747,119417	866,845772	826,806437	-0,381	-21,8296	0,9221
11	0,2894	1,969	112,8153	0,1205	11	12,79	18,2984367	14,826466	17,2024165	16,4078422	0,9029	51,7323	0,747
12	4,31	-2,641	-151,3181	0,3707	12	51,49	73,6658723	59,6884078	69,2535125	66,0547144	-2,193	-125,6496	0,7129

Tabla 4.4. Valores de amplitud, fase y coherencia de todos los canales del ensayo sin daño aplicado a temperatura ambiente para el modo 7.641.

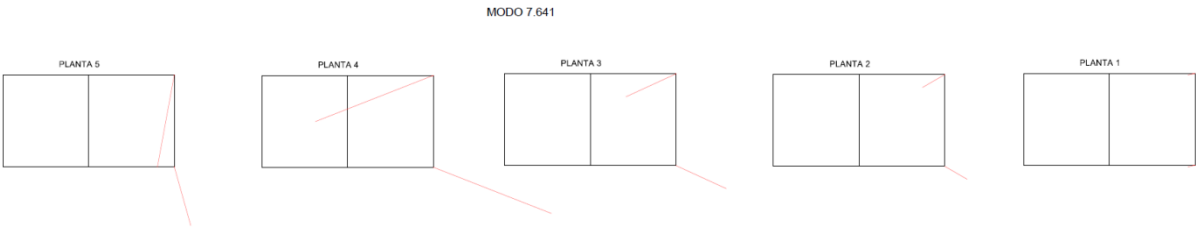


Figura 4.4. Forma modal del modo 4.

La estructura en este modo tiene, posiblemente, un movimiento de flexo-torsión.

- **Modo 5: 8.844**

POSICIÓN INVERSA					POSICIÓN NORMAL								
Canales	Amplitud (m2/(s*Hz))	Fase (rad)	Fase (°)	Coherencia (0-1)	Canales	Amplitud (m2/(s*Hz))	Amplitud norm. 1	Amplitud norm. 2	Amplitud norm. 7	Amplitud norm. 8	Fase (rad)	Fase (°)	Coherencia (0-1)
1	13580	-2,679	-153,4953	0,8935	1	17020	13580	15328,6375	13696,8598	10331,1125	-1,866	-106,9139	0,2722
2	144,1				2	160	127,661575	144,1	128,760139	97,1197411			
3	1116	2,66	152,4068	0,8883	3	1759	1403,47944	1584,19938	1415,55678	1067,71015	-1,444	-82,7351	0,2703
4	62,74	2,894	165,8139	0,9381	4	350,8	279,898002	315,93925	282,306605	212,935032	-2,322	-133,0408	0,3812
5	17860	2,67	152,9797	0,8905	5	24200	19308,8132	21795,125	19474,971	14689,3608	-1,351	-77,4065	0,2663
6	589,7	-1,76	-100,8406	0,5825	6	2138	1705,87779	1925,53625	1720,55736	1297,76254	-2,893	-165,7566	0,8091
7	13890	-0,4496	-25,7601	0,8889	7	17260	13771,4924	15544,7875	13890	10476,7921	-1,286	-73,6823	0,2452
8	3001	0,9374	53,709	0,8692	8	4944	3944,74266	4452,69	3978,6883	3001	0,657	37,6433	0,4461
9	10110	2,673	153,1516	0,8905	9	12880	10276,7568	11600,05	10365,1912	7818,13916	-1,346	-77,1201	0,2679
10	483	-1,648	-94,4234	0,5543	10	1499	1196,02938	1350,03688	1206,32155	909,890574	-2,948	-168,9079	0,8418
11	81,74	2,712	155,3861	0,8899	11	48,26	38,5059224	43,4641625	38,8372769	29,2937419	-0,6299	-36,0906	0,607
12	19,38	-1,849	-105,9399	0,4399	12	162,7	129,815864	146,531688	130,932966	98,7586367	-2,816	-161,3449	0,6195

Tabla 4.5. Valores de amplitud, fase y coherencia de todos los canales del ensayo sin daño aplicado a temperatura ambiente para el modo 8.844.

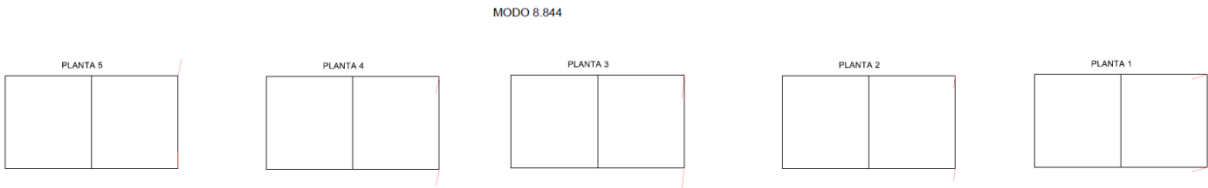


Figura 4.5. Forma modal del modo 5.

El modo 5 es un modo superior de flexión. La dirección de este movimiento es transversal.

- **Modo 6: 9.234**

POSICIÓN INVERSA					POSICIÓN NORMAL								
Canales	Amplitud (m2/(s*Hz))	Fase (rad)	Fase (°)	Coherencia (0-1)	Canales	Amplitud (m2/(s*Hz))	Amplitud norm. 1	Amplitud norm. 2	Amplitud norm. 7	Amplitud norm. 8	Fase (rad)	Fase (°)	Coherencia (0-1)
1	443,9	-0,07548	-4,3246	0,9898	1	2001	449,9	1466,69231	463,562123	1794,246496	-0,003534	-0,2024	0,9841
2	165800				2	226200	50858,2609	1655800	52402,6747	202827,8648			
3	3540	0,001633	0,0935	0,9997	3	3717	835,721289	2734,48541	861,099655	3332,940643	-3,131	-179,393	0,9995
4	66020	3,14	179,9087	0,9999	4	260100	58480,2549	190648,011	60256,126	233225,1443	-3,141	-179,966	1
5	15660	0,01061	0,6079	0,9997	5	35380	7954,75362	25932,8205	8196,31579	31724,35834	-3,136	-179,6795	0,9996
6	2512000	-3,141	-179,966	1	6	3495000	785807,346	2581763,93	809669,974	3133878,813	-3,141	-179,966	1
7	1074	-3,018	-172,9186	0,946	7	4636	1042,34703	3398,09372	1074	4156,984886	2,916	167,0744	0,9725
8	3263000	0,0081	0,464	0,9998	8	3639000	818183,958	2667313	843029,767	3263000	-0,001358	-0,0778	1
9	9220	-0,00695	-0,3982	0,9996	9	33500	7532,05897	24554,8187	7760,78516	30038,60951	3,126	179,1066	0,9993
10	1656000	3,138	179,7941	1	10	1941000	436409,745	1422713,53	449662,209	1740446,002	3,138	179,7941	1
11	48,44	0,006328	0,3625	0,9649	11	60,71	13,6498896	44,4991954	14,064396	54,43713383	0,1774	10,1642	0,8147
12	17950	-3,137	-179,7368	0,9998	12	9764	2195,31414	7156,81344	2261,97929	8755,133828	-3,116	-178,5336	0,9968

Tabla 4.6. Valores de amplitud, fase y coherencia de todos los canales del ensayo sin daño aplicado a temperatura ambiente para el modo 9.234.



Figura 4.6. Forma modal del modo 6.

El modo 6 es un modo superior de flexión longitudinal.

- **Modo 7: 12.23**

POSICIÓN INVERSA					POSICIÓN NORMAL								
Canales	Amplitud (m2/(s*Hz))	Fase (rad)	Fase (°)	Coherencia (0-1)	Canales	Amplitud (m2/(s*Hz))	Amplitud norm. 1	Amplitud norm. 2	Amplitud norm. 7	Amplitud norm. 8	Fase (rad)	Fase (°)	Coherencia (0-1)
1	70080	0,01573	0,9012	0,9917	1	775300	70080	68316,2899	66320,2484	78330,1559	-0,0305	-1,7475	0,9982
2	304				2	3450	311,848317	304	295,117834	348,560606			
3	4908	-0,03692	-2,1153	0,9904	3	55470	5013,97859	4887,7913	4744,98153	5604,24835	-3,13	-179,3358	0,9978
4	11,41	0,7909	45,3152	0,3781	4	121,2	10,955367	10,6796522	10,3676178	12,2450856	0,5136	29,4271	0,8988
5	103600	-0,02344	-1,343	0,9914	5	1150000	103949,439	101333,333	98372,6115	116186,869	-3,117	-178,5909	0,998
6	3418	0,03456	1,9801	0,9825	6	33350	3014,53373	2938,66667	2852,80573	3369,41919	3,109	178,1325	0,9988
7	80580	-3,133	-179,5076	0,9921	7	942000	85148,1491	83005,2174	80580	95172,2003	-3,096	-177,3877	0,9981
8	4601	-3,05	-174,7521	0,9543	8	45540	4116,39778	4012,8	3895,55541	4601	-3,106	-177,9606	0,9968
9	63460	-0,03245	-1,8592	0,9915	9	697600	63056,6336	61469,6812	59673,6815	70479,9649	-3,125	-179,0493	0,998
10	2351	-0,02351	-1,347	0,992	10	33600	3037,13143	2960,69565	2874,19108	3394,67721	3,135	179,6222	0,9985
11	355,1	-0,07716	-4,4209	0,9901	11	3339	301,814936	294,21913	285,622739	337,346047	-3,105	-177,9034	0,9929
12	62,64	-2,68	-153,5527	0,694	12	65,18	5,89167342	5,7433971	5,57558854	6,58526965	-2,143	-122,7848	0,4674

Tabla 4.7. Valores de amplitud, fase y coherencia de todos los canales del ensayo sin daño aplicado a temperatura ambiente para el modo 12.23.

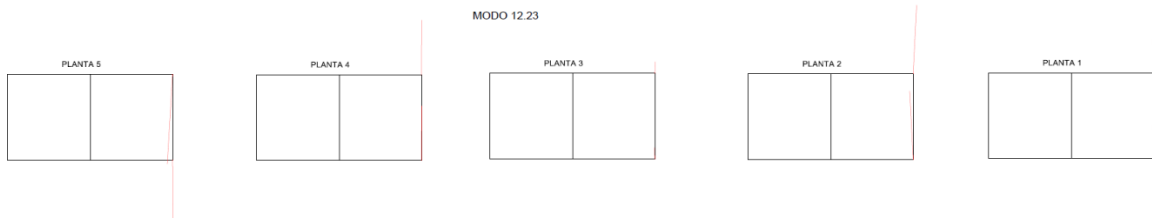


Figura 4.7. Forma modal del modo 7.

El modo 7 es un modo superior de flexión transversal.

- **Modo 8: 13.02**

POSICIÓN INVERSA					POSICIÓN NORMAL								
Canales	Amplitud (m2/(s*Hz))	Fase (rad)	Fase (º)	Coherencia (0-1)	Canales	Amplitud (m2/(s*Hz))	Amplitud norm. 1	Amplitud norm. 2	Amplitud norm. 7	Amplitud norm. 8	Fase (rad)	Fase (º)	Coherencia (0-1)
1	4610	-0,08885	-5,0907	0,7307	1	26130	4610	784,51773	4675,70293	1202,22535			
2	10,16				2	338,4	59,702411	10,16	60,5533054	15,5695775	-0,7708	-44,1635	0,7881
3	2038	-3,042	-174,2937	0,6815	3	10390	1833,06162	311,945626	1859,18689	478,037559	1,535	87,949	0,5624
4	11,11	1,66	95,1109	0,486	4	231,1	40,771948	6,93846336	41,3530404	10,63277	1,21	69,3278	0,8905
5	467,5	-2,987	-171,1424	0,5057	5	9541	1683,27631	286,455556	1707,26681	438,975587	2,61	149,542	0,7457
6	107,3	0,495	28,3614	0,6771	6	2899	511,457711	87,0385343	518,747141	133,381221	2,845	163,0064	0,9603
7	5132	-3,02	-173,0333	0,7085	7	28680	5059,88519	861,078014	5132	1319,5493	-2,375	-136,0774	0,7925
8	215,6	-2,634	-150,917	0,638	8	4686	826,730195	140,69078	838,512971	215,6	-2,906	-166,5015	0,9782
9	53,93	-2,707	-155,0996	0,3605	9	2979	525,571757	89,4404255	533,062343	137,061972	2,795	160,1417	0,8444
10	23,65	-0,1214	-6,9557	0,6814	10	3742	660,184462	112,348463	669,593584	172,167136	-3,129	-179,2784	0,964
11	16,44	-2,893	-165,7566	0,726	11	827,2	145,939227	24,8355556	148,019191	38,0589671	0,1627	9,322	0,9794
12	44,4	-2,032	-116,425	0,5786	12	1043	184,011864	31,3146572	186,634449	47,9877934	-2,576	-147,5939	0,9515

Tabla 4.8. Valores de amplitud, fase y coherencia de todos los canales del ensayo sin daño aplicado a temperatura ambiente para el modo 13.02.

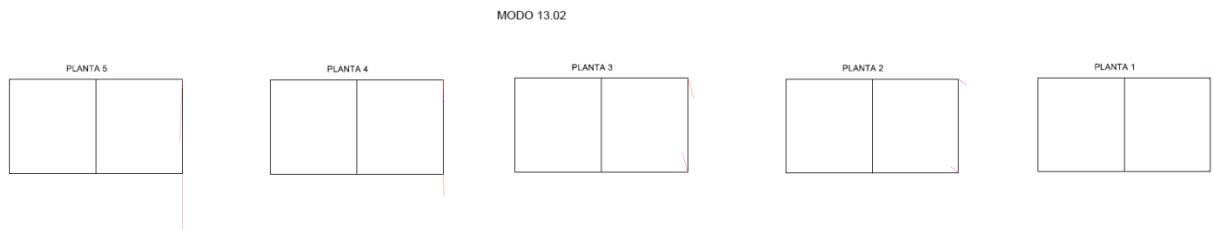


Figura 4.8. Forma modal del modo 8.

El modo 8 parece ser una flexión en los pisos superiores pero en las plantas inferiores no presenta un movimiento evidente ni de flexión ni de torsión.

- **Modo 9: 14.31**

POSICIÓN INVERSA					POSICIÓN NORMAL								
Canales	Amplitud (m2/(s*Hz))	Fase (rad)	Fase (º)	Coherencia (0-1)	Canales	Amplitud (m2/(s*Hz))	Amplitud norm. 1	Amplitud norm. 2	Amplitud norm. 7	Amplitud norm. 8	Fase (rad)	Fase (º)	Coherencia (0-1)
1	46,97	-2,946	-168,7933	0,8926	1	252,2	46,97	38,8283641	42,038949	39,1503349	-2,985	-171,0279	0,9612
2	558,1				2	3625	675,12391	558,1	604,247384	562,727851			
3	57,1	3,121	178,8201	0,9871	3	424	78,9662173	65,2784552	70,6761078	65,8197541	-0,09115	-5,2225	0,9932
4	23,22	-1,601	-91,7305	0,7295	4	1907	355,161737	293,59909	317,875796	296,033658	-2,978	-170,6268	0,9955
5	96,55	3,044	174,4083	0,9588	5	433	80,642387	66,6640828	72,1763082	67,2168716	-0,1722	-9,8663	0,9926
6	3637	-0,1254	-7,1848	0,9949	6	39300	7319,27439	6050,57379	6550,87508	6100,74608	-3,132	-179,4503	0,9996
7	74,86	-0,08615	-4,936	0,7163	7	449,1	83,6408684	69,1428166	74,86	69,7161594	-0,08303	-4,7572	0,9678
8	3662	3,02	173,0333	0,991	8	23590	4393,42704	3631,88386	3932,19194	3662	3,043	174,351	0,9977
9	13,4	2,831	162,2043	0,9298	9	1,494	0,27824417	0,23001418	0,24903327	0,23192149	-1,922	-110,1224	0,2609
10	3994	-0,02086	-1,1951	0,9984	10	18350	3417,52379	2825,14069	3058,74193	2848,56719	3,062	175,4396	0,998
11	2,57	2,645	151,5473	0,1059	11	8,579	1,59776221	1,32081101	1,43002436	1,33176337	1,884	107,9452	0,3341
12	227,8	0,3122	17,8877	0,9444	12	371,6	69,2071848	57,2110234	61,9416077	57,685426	0,4105	23,5199	0,9219

Tabla 4.9. Valores de amplitud, fase y coherencia de todos los canales del ensayo sin daño aplicado a temperatura ambiente para el modo 14.31.



Figura 4.9. Forma modal del modo 9.

El modo 9 parece presentar una cizalla en la dirección longitudinal.

- **Modo 10: 16.87**

POSICIÓN INVERSA					POSICIÓN NORMAL								
Canales	Amplitud (m2/(s*Hz))	Fase (rad)	Fase (º)	Coherencia (0-1)	Canales	Amplitud (m2/(s*Hz))	Amplitud norm. 1	Amplitud norm. 2	Amplitud norm. 7	Amplitud norm. 8	Fase (rad)	Fase (º)	Coherencia (0-1)
1	14710	3,061	175,3823	0,986	1	13350	14710	14715,0178	14502,4446	3852,40068	2,65	151,8338	0,5738
2	465,7				2	422,5	465,541199	465,7	458,972498	121,920546			
3	8494	-3,067	-175,7261	0,985	3	8785	9679,95131	9683,25325	9543,36898	2535,08165	0,5174	29,6448	0,5159
4	18480	0,1954	11,1955	0,9501	4	9890	10897,5206	10901,2379	10743,7586	2853,95077	2,79	159,8552	0,7147
5	2771	-3,068	-175,7834	0,985	5	2310	2545,32584	2546,19408	2509,41176	666,595174	0,4933	28,264	0,4988
6	5993	0,1732	9,9236	0,9546	6	1305	1437,94382	1438,43432	1417,6547	376,582988	-3,071	-175,9553	0,926
7	14220	0,1149	6,5832	0,9827	7	13090	14423,5131	14428,4331	14220	3777,37265	0,4755	27,2441	0,572
8	11840	-3,082	-176,5855	0,9559	8	41030	45209,8352	45225,2568	44571,9328	11840	-2,062	-118,1439	0,289
9	3066	0,03493	2,0013	0,9823	9	3622	3990,98277	3992,34414	3934,67074	1045,19815	-2,51	-143,8124	0,3916
10	14350	-2,936	-168,2204	0,9457	10	14430	15900,0225	15905,4462	15675,6761	4164,05557	-0,5567	-31,8965	0,5023
11	499,5	0,02885	1,6529	0,9729	11	533,4	587,738876	587,939361	579,445989	153,922886	-2,467	-141,3486	0,1124
12	1451	-2,758	-158,0217	0,8755	12	4173	4598,11461	4599,68308	4533,23606	1204,19985	-1,135	-65,0307	0,2763

Tabla 4.10. Valores de amplitud, fase y coherencia de todos los canales del ensayo sin daño aplicado a temperatura ambiente para el modo 16.87.

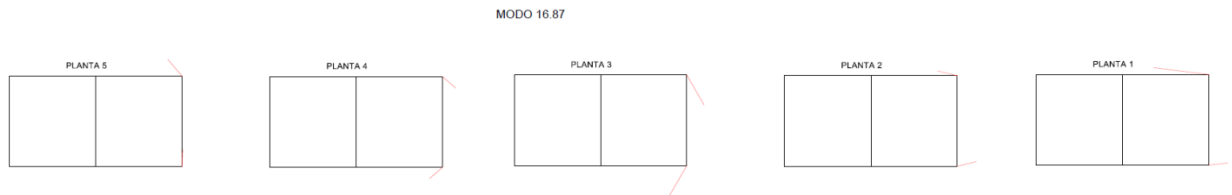


Figura 4.10. Forma modal del modo 10.

Este modo es un modo superior de torsión.

En resumen:

- Los modos 1 y 2 son flexiones, transversal en el 1 y longitudinal en el 2.
- Los modos 3 y 10 son torsiones.
- El modo 4 es una flexo-torsión.
- Los modos 5, 6, 7 y 8 son flexiones. El 6 es longitudinal, el 7 es transversal y en el 8 se presenta en las plantas superiores.
- El modo 9 es una cizalla en dirección longitudinal.

4.2 Modelado numérico

El modelado numérico de la estructura del laboratorio se ha efectuado en el programa SAP2000 (Computers & Structures Inc., 2016).

SAP2000 es un programa para el análisis tridimensional estático y dinámico de estructuras por elementos finitos. Se puede combinar con otros programas para ampliar la capacidad de trabajo; con archivos Excel, Autocad o cualquier programa DXF que definan la geometría del modelo estructural.

4.2.1 Procedimiento del modelado numérico

Los pasos a seguir para crear el modelo numérico son los siguientes:

1- Definición de la geometría del modelo

Se definen las unidades con las que se va a trabajar, en este caso son KN, m y C.

Se crea la geometría de la estructura definiendo las longitudes de las vigas y las columnas, mencionadas en el Capítulo 3.1. También se asignan las uniones entre vigas y columnas como flexibles con la rigidez predeterminada por el programa. Más adelante, para aplicarle daños a la estructura, esta rigidez será modificada.

Una vez realizado lo anteriormente dicho, queda definida la geometría del modelo donde a continuación se muestran las vistas en 2-D y 3-D del modelo (Figura 4.11).

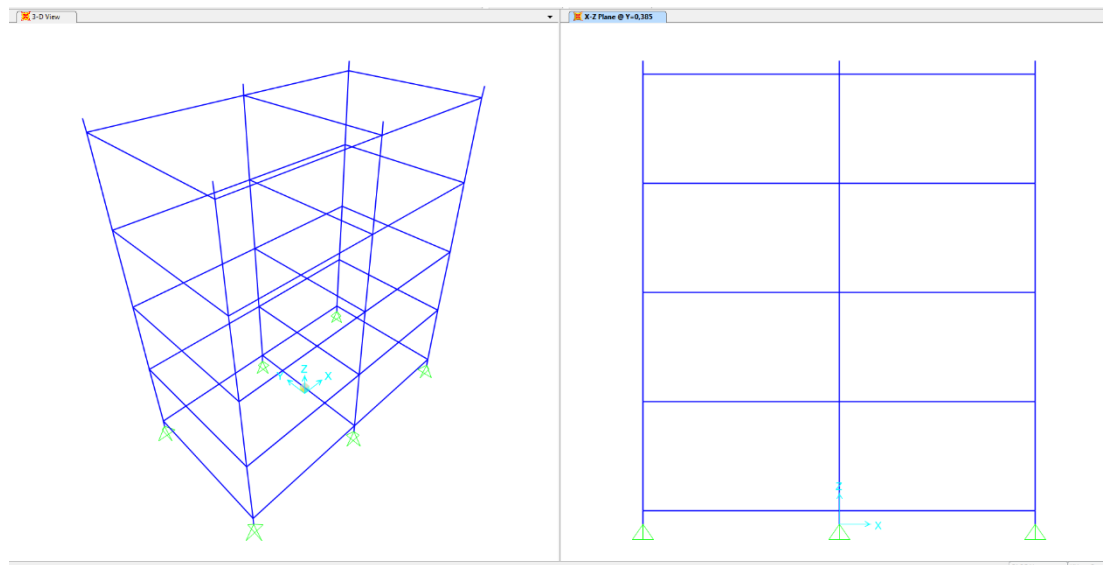


Figura 4.11. Captura de pantalla del programa SAP2000 donde se muestra el modelo en 2-D y 3D.

2- Definición de los materiales

Para esta estructura se utilizó un tipo de acero que no se encuentra predefinido dentro del SAP2000. Las propiedades de dicho material (Foti y Canas, 1999) asignadas se describen en la siguiente lista:

Nombre del material: Steel F111

Tipo de diseño: Steel

Tipo de material: Isotrópico

Masa por unidad de volumen: 7.849 kg/m^3

Peso por unidad de volumen: 76.9729 kg/m^3

Módulo de Elasticidad, E: 205000000 KN/m^2

Coefficiente de Poisson: 0.3

Coefficiente de expansión térmica, A: $1.170\text{E-}05 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

Tensión de fluencia mínima, Fy: 225553 KN/m^2

Esfuerzo de tracción mínimo, Fu: 392266 KN/m^2

Tensión de fluencia efectiva, Fye: 248108.3 KN/m^2

Esfuerzo de tracción efectivo, Fue: 431492.6 KN/m^2

3- Definición de las secciones estructurales

En este paso se crean los dos tipos de secciones que hay en el modelo: las columnas y las vigas.

Las columnas se definen con las propiedades siguientes:

Nombre de la sección: Columnas

Sección (t3): 0.02 m

Sección (t2): 0.02 m

Espesor de la sección t2 (tf): 2E-03 m

Espesor de la sección t3 (tw): 2E-03 m

Material: Steel F111

Las vigas se definen con las siguientes propiedades:

Nombre de la sección: Vigas

Alto (t3): 0.01 m

Ancho (t2): 0.02 m

Material: Steel F111

4- Definición de las cargas estáticas

En el modelo se definen 5 cargas distintas:

- Muerta: definida como estática lineal. Se asigna a los pesos de 4.5 kg que hay en el punto medio de cada viga.
- Modal: definida como modal. Se asigna a la aceleración de la estructura. Es una carga muerta y estática, con un número máximo de 12 modos y un mínimo de 1.
- Peso: definida como estática no lineal. Se asigna al peso propio de la estructura, como carga muerta y con un factor de escala de 1. Es una carga modal en los casos que haya cargas modales. Los parámetros de no linealidad geométrica están caracterizados por P-Delta.

5- Asignación de las secciones para los miembros

En este paso se asignan a las columnas y vigas creadas en el paso 1 las secciones creadas en el paso 3 (Figura 4.12).

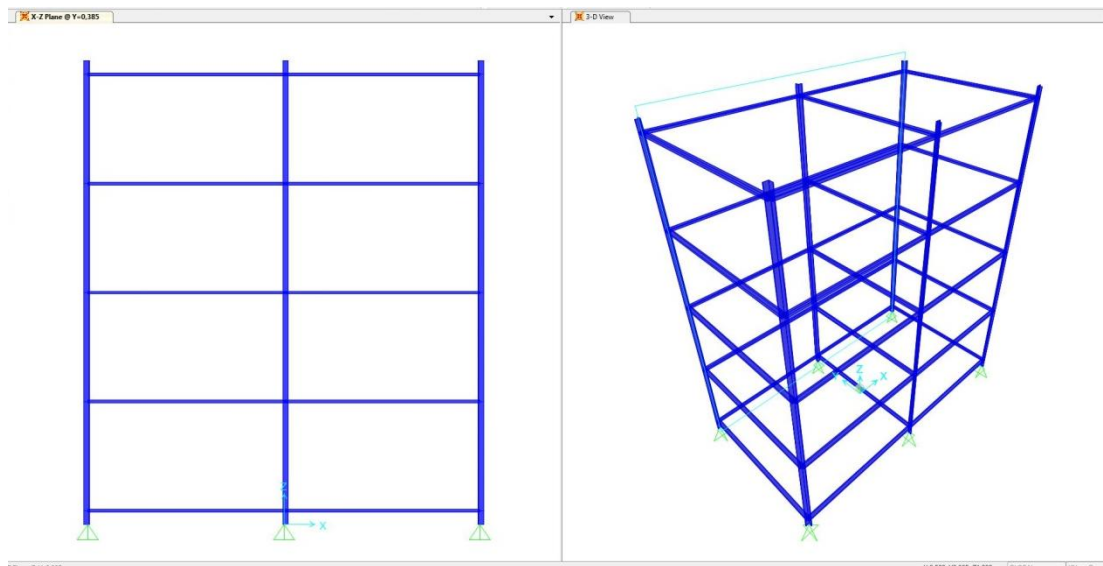


Figura 4.12. Captura de pantalla del programa SAP2000 donde se muestra el modelo en 2-D y 3-D con las secciones de columnas y vigas asignadas.

6- Asignación de las cargas

Se asigna la carga muerta creada en el punto 4 como una carga puntual en el centro de cada viga (Figura 4.13).

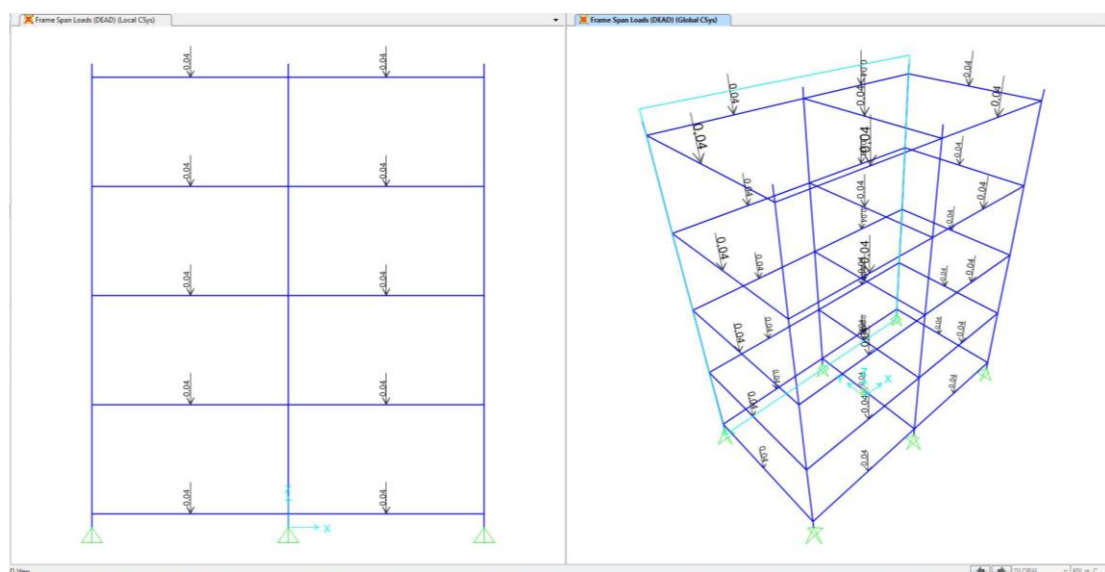


Figura 4.13. Captura de pantalla del programa SAP2000 donde se muestra el modelo en 2-D y 3-D con las cargas muertas asignadas en el centro de cada viga.

7- Análisis del modelo

Una vez realizados los pasos anteriores, se ejecuta el programa. En los resultados obtenidos se puede ver la deformada de la estructura en cada modo, así como las rotaciones y los desplazamientos de los nodos.

4.2.2 Resultados del modelado numérico

En primer lugar se han evaluado los valores de las frecuencias de cada modo comparándolas con las frecuencias del ensayo experimental (sin daño aplicado). En la Tabla 4.11 se muestran los valores del modelo empotrado y del articulado con los valores del ensayo de laboratorio.

MODELO ARTICULADO				MODELO EMPOTRADO			
MODO	Frecuencia SAP	Frecuencia ensayo	% de error	MODO	Frecuencia SAP	Frecuencia ensayo	% de error
1	2,357	2,516	6,32	1	2,661	2,516	5,76
2	2,664	2,578	3,34	2	2,864	2,578	11,09
3	2,932	3,734	21,48	3	3,312	3,734	11,30
4		7,641		4		7,641	
4	8,208	8,844	7,19	4	9,137	8,844	3,31
5	9,044	9,234	2,06	5	9,876	9,234	6,95
6	10,325	12,23	15,58	6	11,532	12,23	5,71
7	13,755	13,02	5,65	7		13,02	
8	15,945	14,31	11,43	7	13,76	14,31	3,84
9	16,024	16,87	5,01	8	16,052	16,87	4,85

Tabla 4.11. Valores de las frecuencias de los dos modelos en SAP y del ensayo experimental.

Los valores del modelo articulado son más parecidos a los del ensayo experimental que los del modelo empotrado.

En los dos modelos numéricos, articulado y empotrado, no se ha obtenido el modo 4 del ensayo experimental. Tampoco el modo 7 en el modelo empotrado.

A continuación se ajustan los modelos para obtener los valores de las frecuencias lo más parecidas posibles a los del ensayo experimental.

Se ha observado en la estructura de laboratorio que la sección transversal es más rígida que la longitudinal debido a las uniones viga-columna. Por todo ello se ha calibrado el modelo cambiando las rigideces de las uniones vigas-columnas.

En primer lugar se ha eliminado el duplicado del peso de la estructura y, en segundo lugar, se han ajustado las uniones vigas-columnas en las direcciones transversal y longitudinal.

Caso de estructura articulada

Para ajustar el modelo se ha hecho lo siguiente:

- Se han ajustado las uniones vigas-columnas en dirección transversal. Asignando la fijación en el inicio y final de las vigas con un valor de momento de 17.5 KN*m.
- Se han ajustado las uniones vigas-columnas en dirección longitudinal. Asignando la fijación en el inicio y final de las vigas con un valor de momento de 4.5 KN*m.

Los valores de las frecuencias del modelo calibrado se presentan en la tabla 4.12 junto a los del ensayo de laboratorio.

MODELO ARTICULADO CALIBRADO			
MODO	Frecuencia SAP	Frecuencia ensayo	% de error
1	2,516	2,516	0,00
2	2,573	2,578	0,19
3	3,055	3,734	18,18
4		7,641	
4	8,822	8,844	0,25
5	9,02	9,234	2,32
6	10,937	12,23	10,57
7	15,034	13,02	15,47
8	17,219	14,31	20,33
9	17,523	16,87	3,87

Tabla 4.12. Valores de las frecuencias del modelo articulado en SAP y del ensayo experimental.

Los dos primeros modos y el cuarto, quinto y noveno se han ajustado muy bien al ensayo experimental. En cambio, los modos 3 y 6 dan valores de frecuencia menores y los modos 7 y 8 dan valores mayores.

A continuación se presentan los diagramas de deformación en 3-D y en 2-D (Figuras de la 4.14 a la 4.22) de cada modo.

- *Modo 1: 2.516*

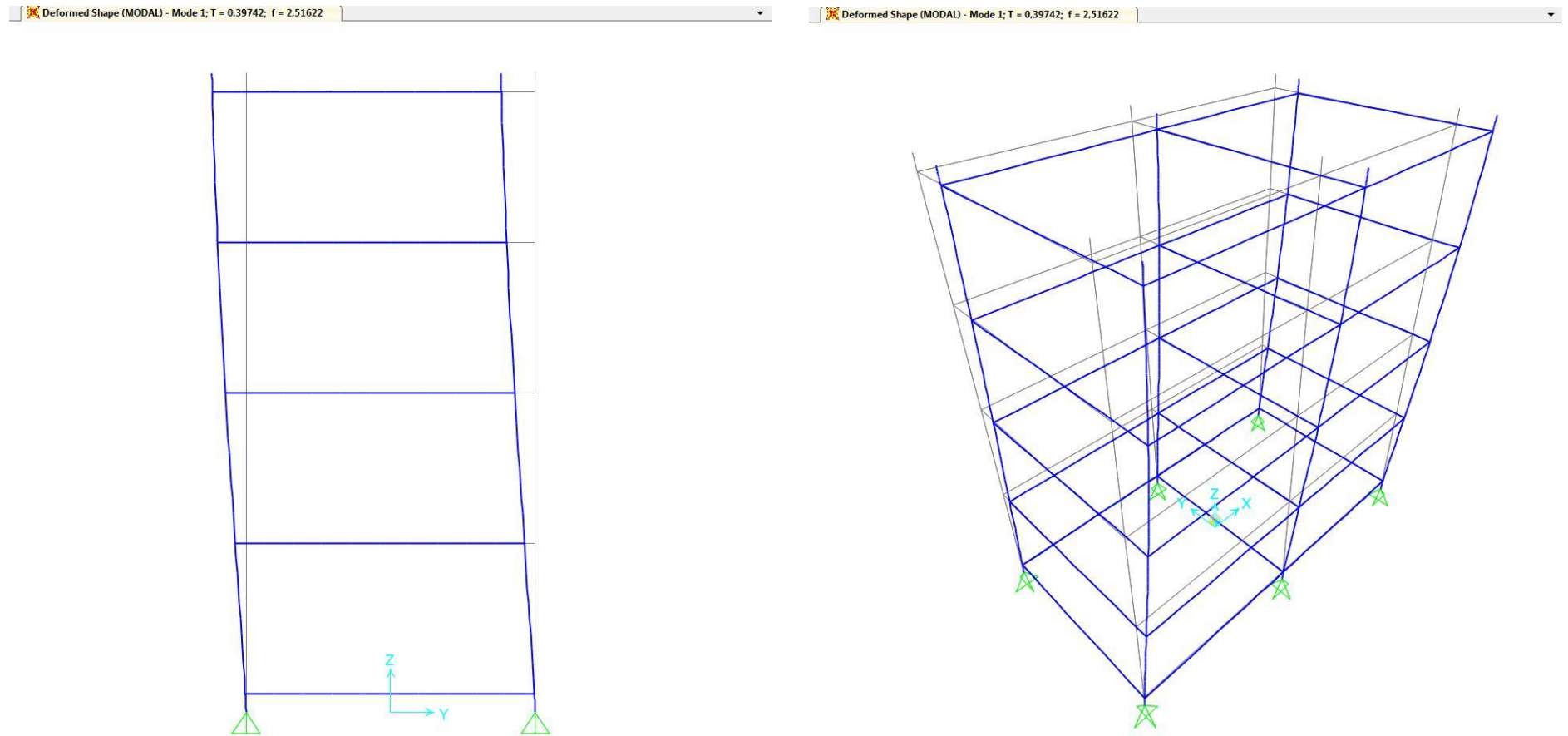
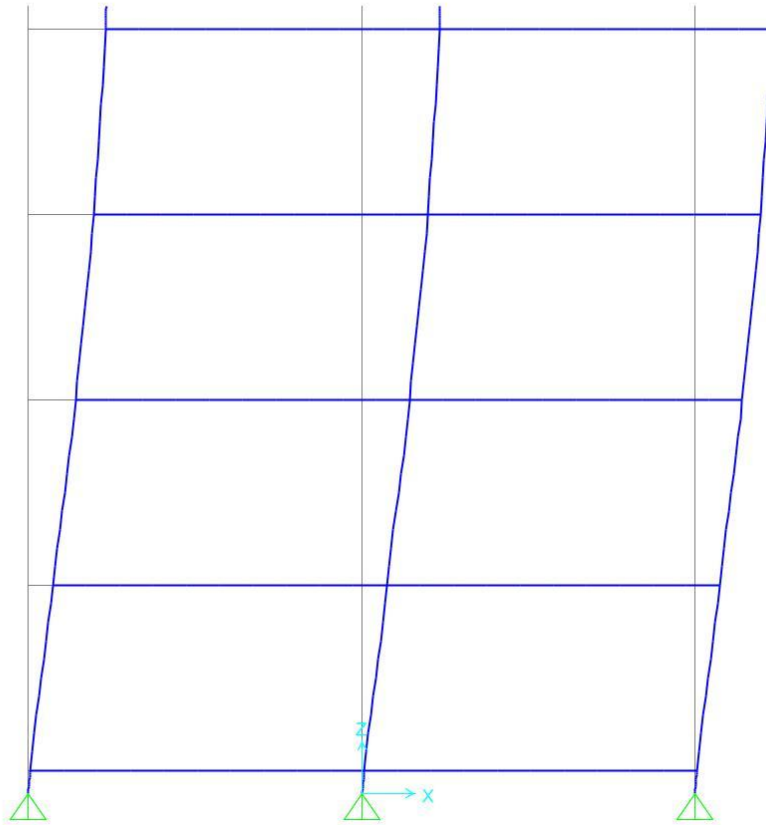


Figura 4.14. Diagramas en 2-D (sección transversal) y 3-D de deformación del modo 1.

- *Modo 2: 2.573*

Deformed Shape (MODAL) - Mode 2; T = 0,38851; f = 2,57391



Deformed Shape (MODAL) - Mode 2; T = 0,38851; f = 2,57391

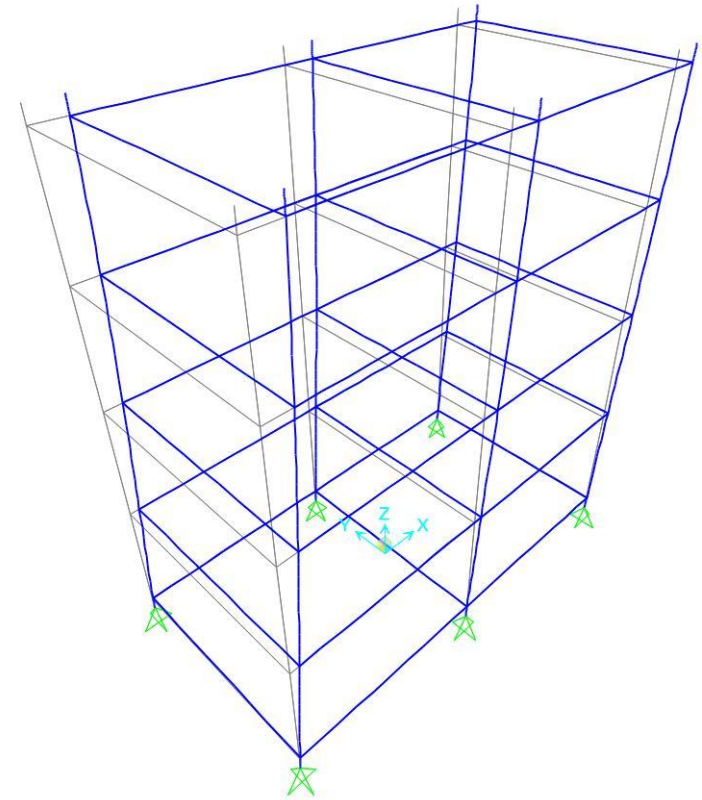


Figura 4.15. Diagramas en 2-D (sección longitudinal) y 3-D de deformación del modo 2.

- *Modo 3: 3.055*

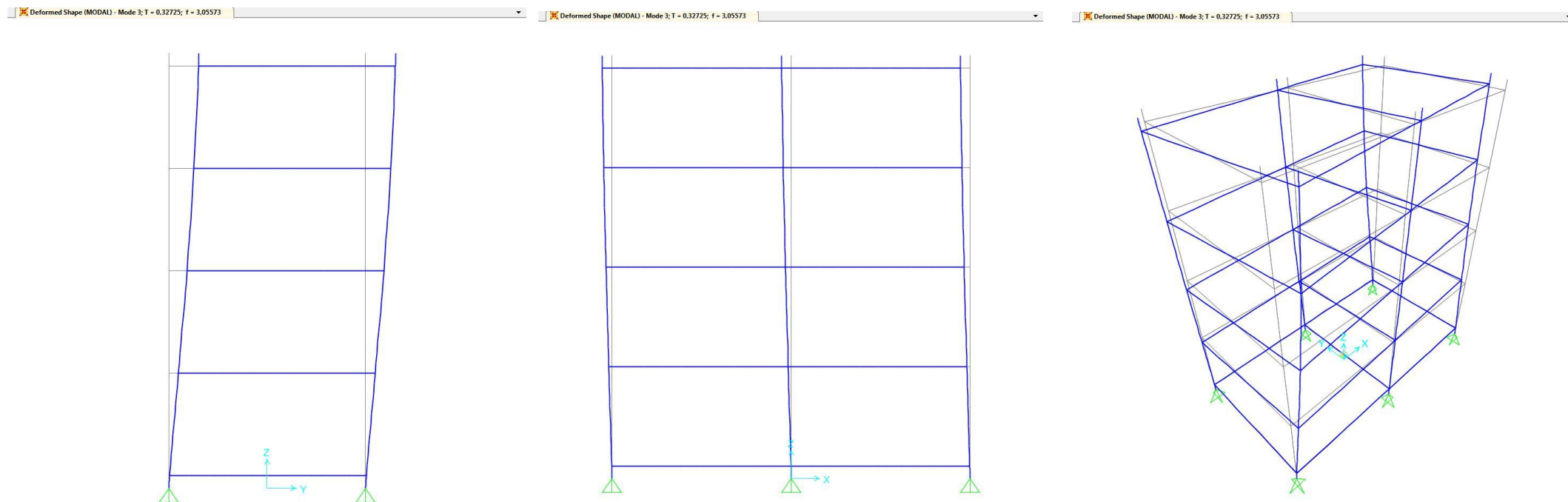


Figura 4.16. Diagramas en 2-D (secciones transversal y longitudinal) y 3-D de deformación del modo 3.

- *Modo 4: 8.822*

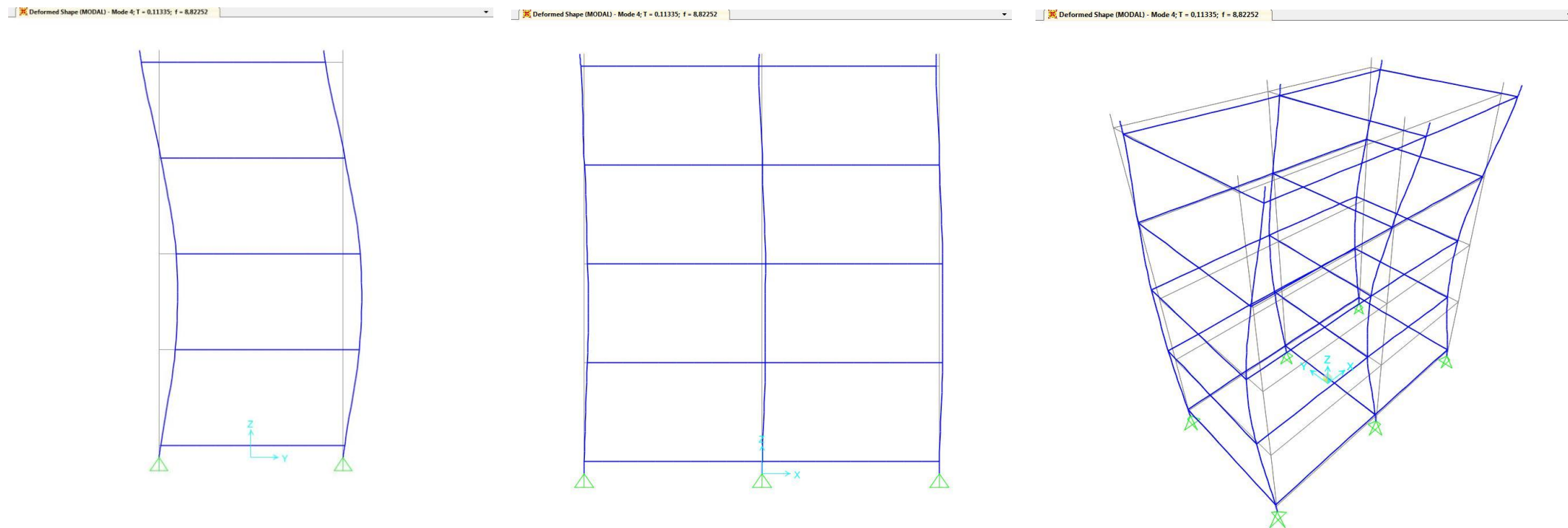


Figura 4.17. Diagramas en 2-D (secciones transversal y longitudinal) y 3-D de deformación del modo 4.

- Modo 5: 9.02

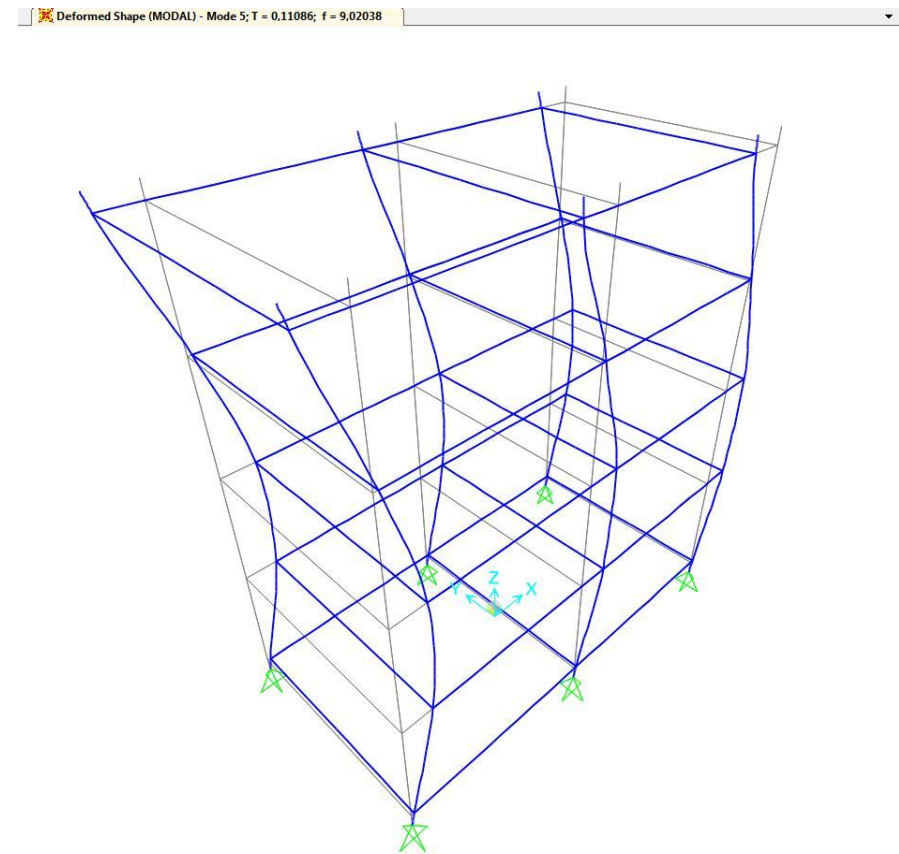
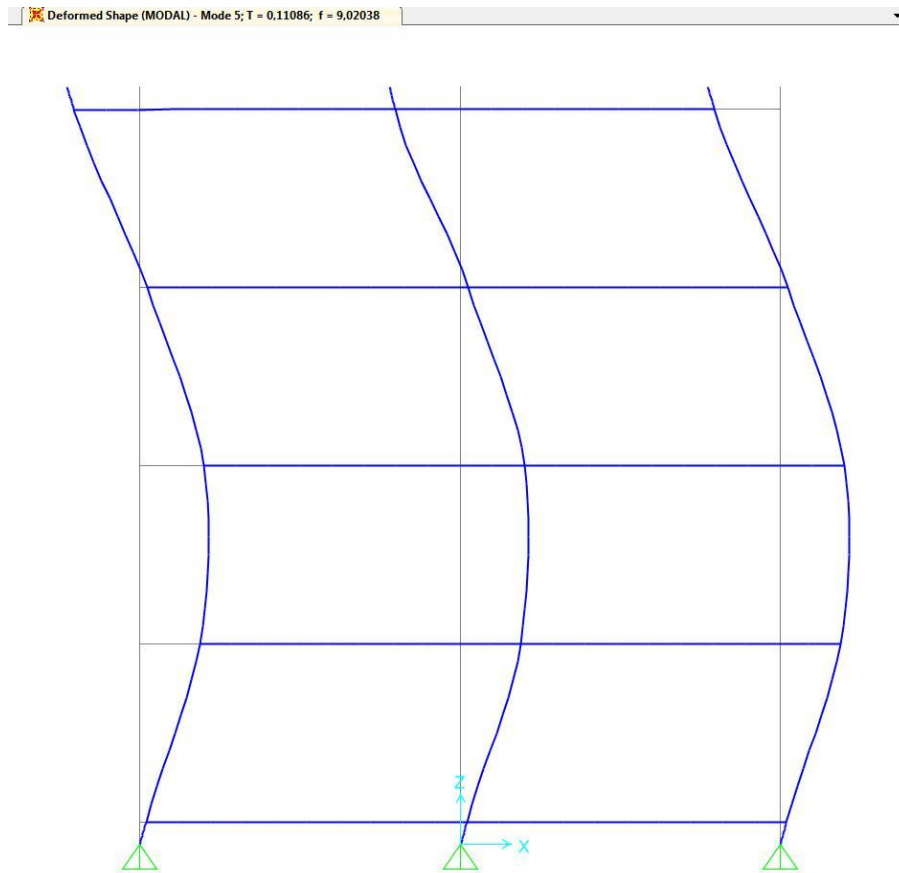


Figura 4.18. Diagramas en 2-D (sección longitudinal) y 3-D de deformación del modo 5.

- *Modo 6: 10.937*

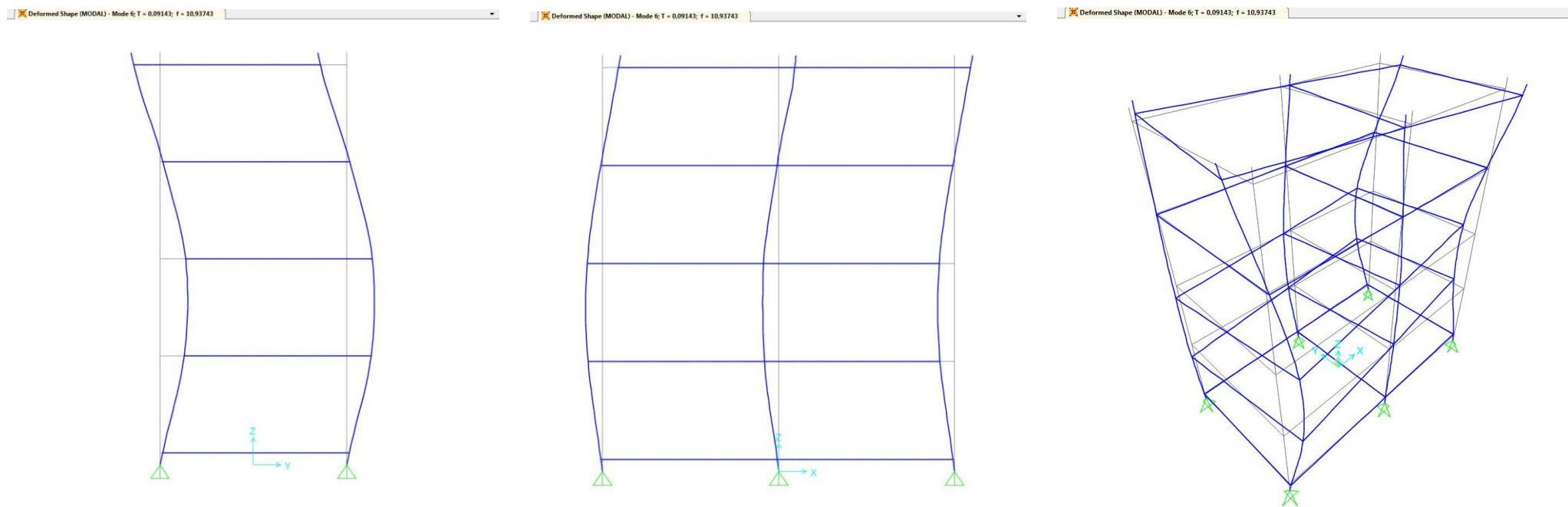


Figura 4.19. Diagramas en 2-D (secciones transversal y longitudinal) y 3-D de deformación del modo 6.

- *Modo 7: 15.034*

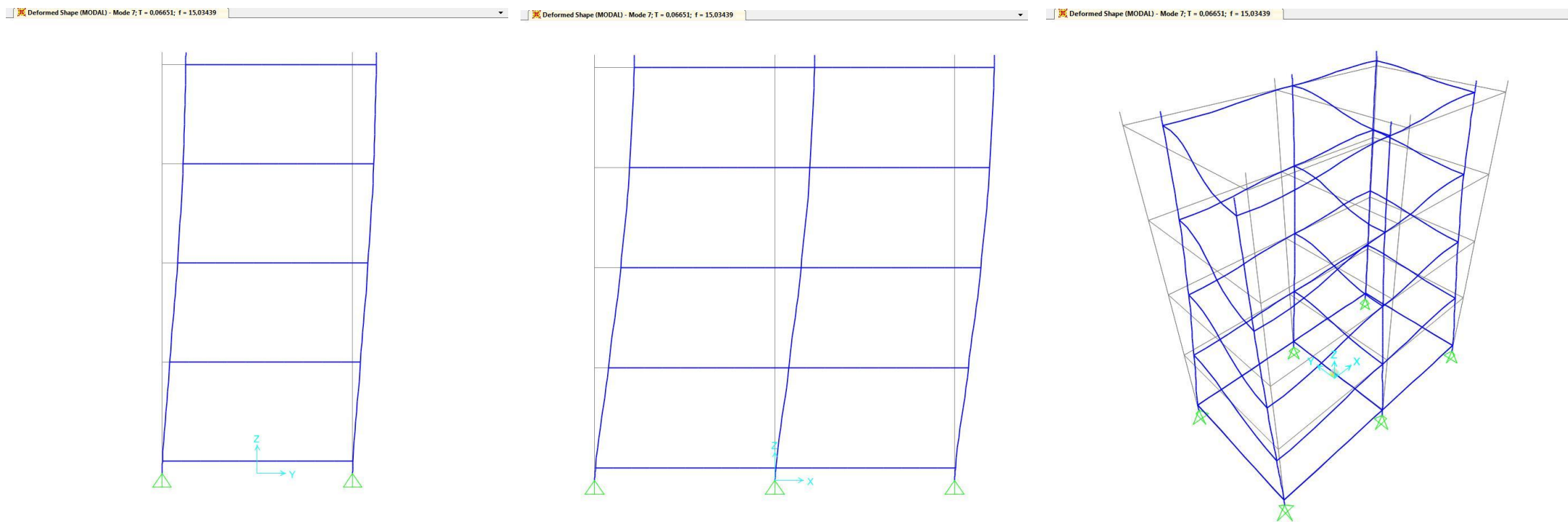


Figura 4.20. Diagramas en 2-D (secciones transversal y longitudinal) y 3-D de deformación del modo 7.

- Modo 8: 17.219

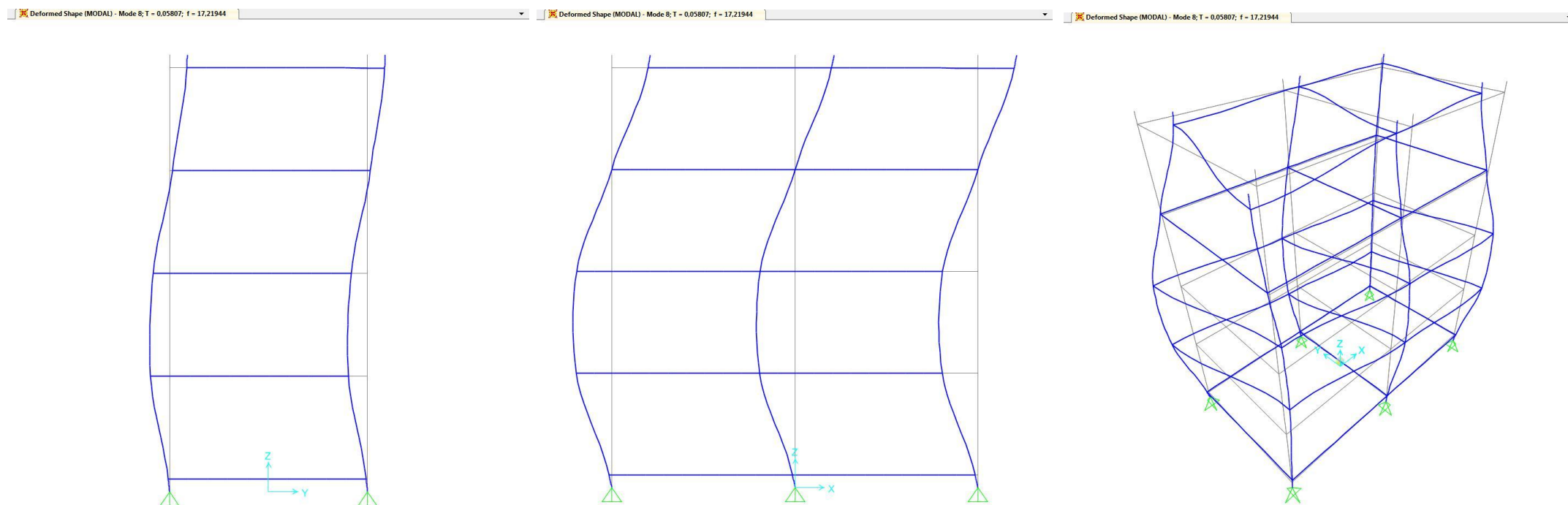
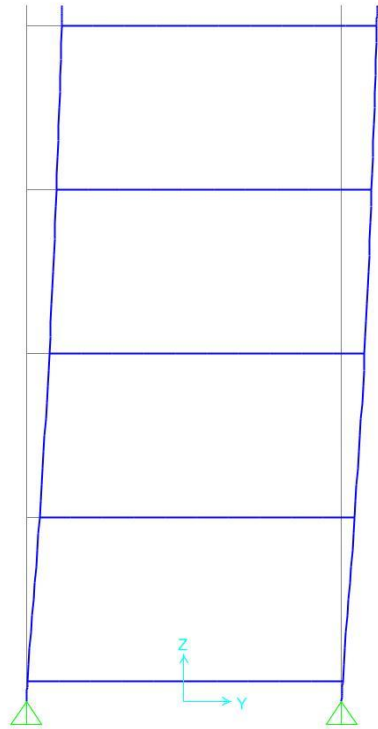


Figura 4.21. Diagramas en 2-D (secciones transversal y longitudinal) y 3-D de deformación del modo 8.

- *Modo 9: 17.523*

Deformed Shape (MODAL) - Mode 9; T = 0.05707; f = 17.52327



Deformed Shape (MODAL) - Mode 9; T = 0.05707; f = 17.52327

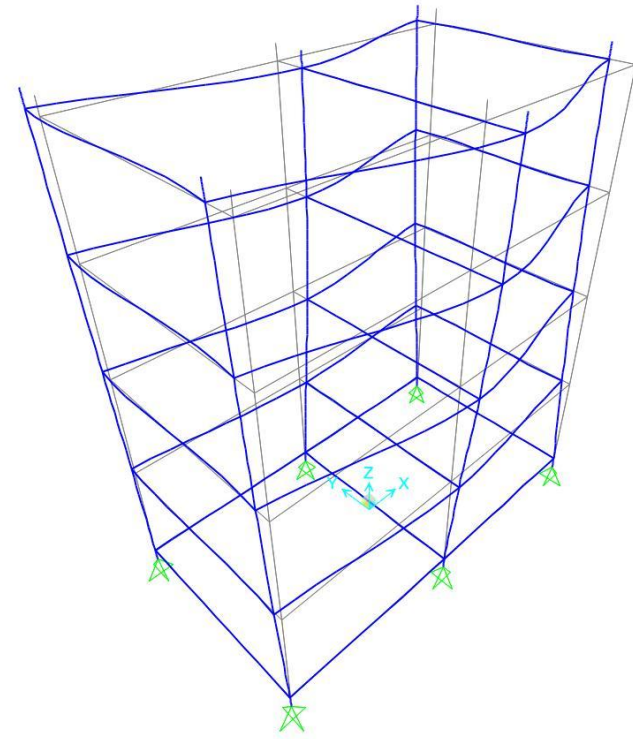


Figura 4.22. Diagramas en 2-D (sección transversal) y 3-D de deformación del modo 9.

Resumiendo:

- En el modo 1: la oscilación es transversal tal y como muestra la Figura 4.14.
- En el modo 2: la oscilación es longitudinal tal y como muestra la Figura 4.15.
- En el modo 3: hay un movimiento torsional tal y como muestra la Figura 4.16.
- En el modo 4: hay una flexión transversal tal y como muestra en la Figura 4.17.
- En el modo 5: hay una flexión longitudinal tal y como muestra en la Figura 4.18.
- En el modo 6: hay una torsión en la planta superior (planta 5) y una flexión en el resto de las plantas de la estructura, tal y como muestra la Figura 4.19.
- En el modo 7: hay una flexión en toda la estructura entre los nodos diagonales opuestos. La flexión es en dirección transversal tal y como muestra la Figura 4.20.
- En el modo 8: Hay una modo superior de torsión tal y como muestra la Figura 4.21.
- En el modo 9: Hay una flexión en dirección transversal a la de golpeo. Esta flexión se produce entre las dos columnas exteriores y la central, ésta última tiene misma dirección pero sentido opuesto a las exteriores, tal y como muestra la Figura 4.22.

Caso estructura empotrada

En este caso se ha eliminado el duplicado del peso de la estructura.

En la Tabla 4.13 se muestran los nuevos valores de frecuencias del modelo numérico y del ensayo experimental.

MODELO EMPOTRADO CALIBRADO			
MODO	Frecuencia SAP	Frecuencia ensayo	% de error
1	2,855	2,516	13,47
2	2,908	2,578	12,80
3	3,513	3,734	5,92
4		7,641	
4	9,861	8,844	11,50
5	10,076	9,234	9,12
6	12,37	12,23	1,14
7		13,02	
7	15,072	14,31	5,32
8	17,48	16,87	3,62

Tabla 4.13. Valores de las frecuencias del modelo empotrado en SAP y del ensayo experimental.

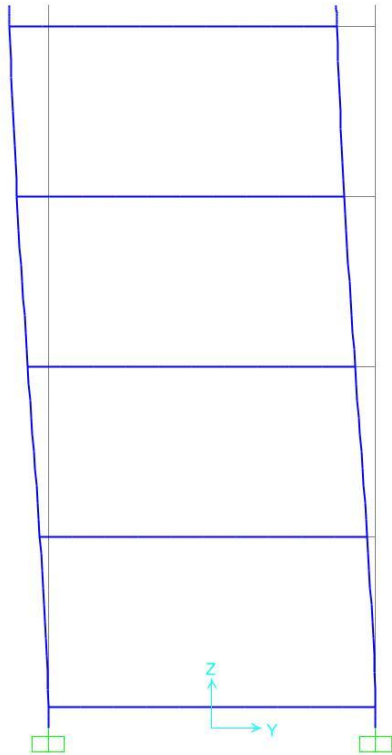
Los modos 3, 5, 6, 7 y 8 se han ajustado mucho a los del ensayo experimental, ya que su error relativo es menor al 10%. El resto de modos dan valores parecidos pero un poco mayores a los del ensayo con errores mayores al 10%.

En resumen, el modelo se ha ajustado para las torsiones, flexiones de los últimos nodos y cizalla. En cambio las flexiones de los primeros modos y la flexo-torsión no se han podido ajustar tanto al ensayo experimental.

A continuación se presentan los diagramas de deformación en 3-D y en 2-D (Figuras de 4.23 a 4.30) de cada modo.

- *Modo 1: 2.855*

Deformed Shape (MODAL) - Mode 1; T = 0.35015; f = 2.85593



Deformed Shape (MODAL) - Mode 1; T = 0.35015; f = 2.85593

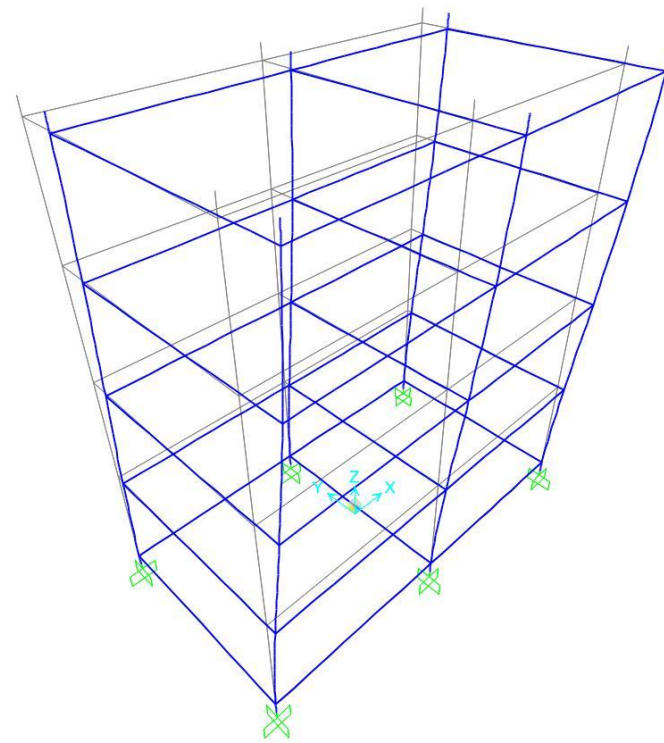
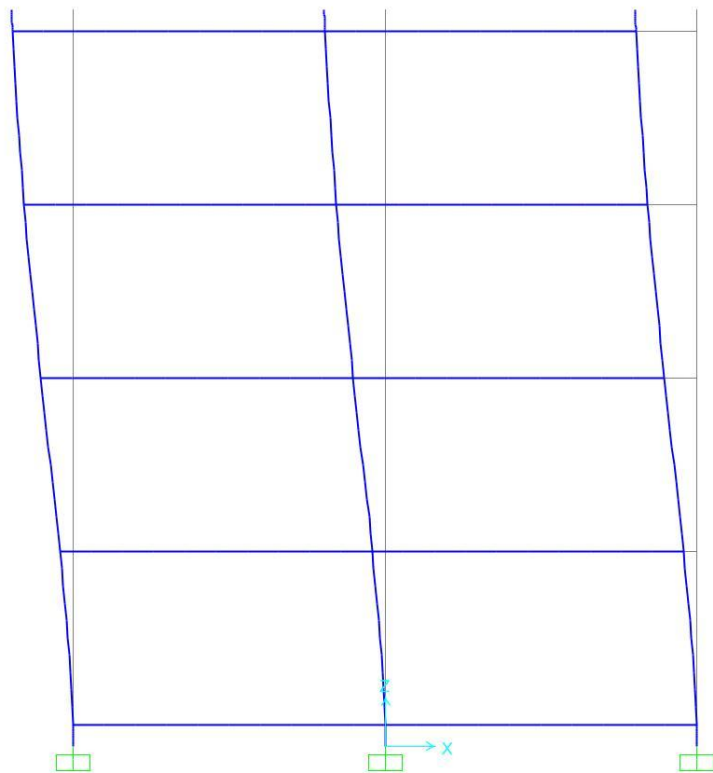


Figura 4.23. Diagramas en 2-D (sección transversal) y 3-D de deformación en el modo 1.

- *Modo 2: 2.908*

Deformed Shape (MODAL) - Mode 2; T = 0.34377; f = 2.90892



Deformed Shape (MODAL) - Mode 2; T = 0.34377; f = 2.90892

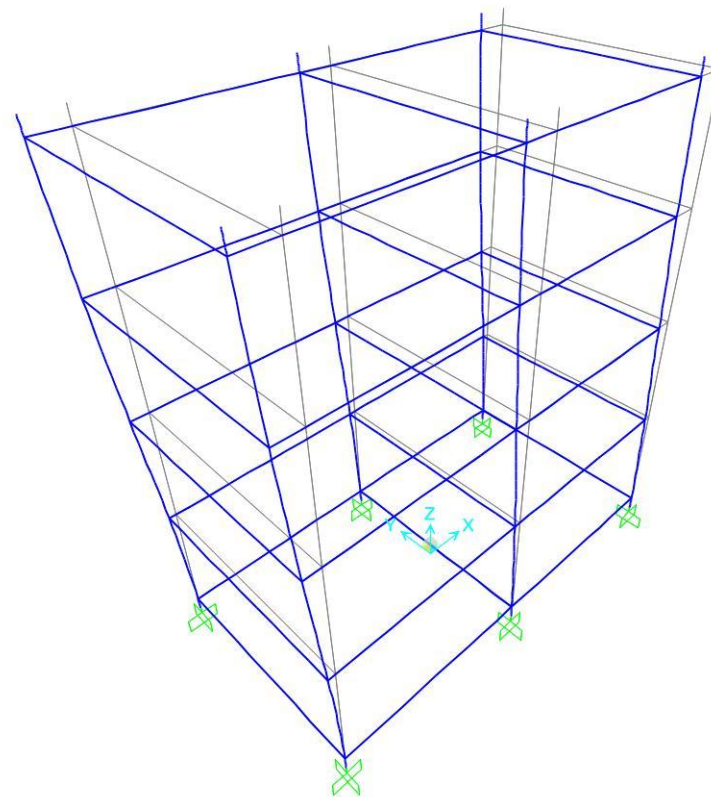


Figura 4.24. Diagramas en 2-D (sección longitudinal) y 3-D de deformación en el modo 2.

- *Modo 3: 3.513*

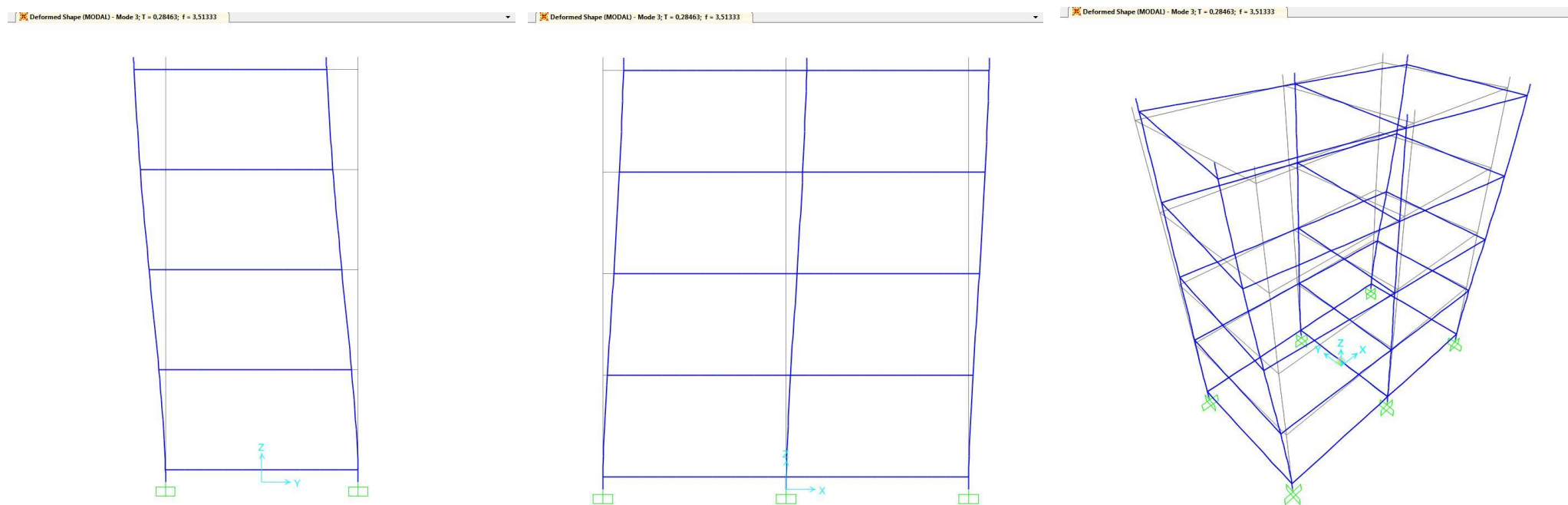


Figura 4.25. Diagramas en 2-D (secciones transversal y longitudinal) y 3-D de deformación en el modo 3.

- *Modo 4: 9.861*

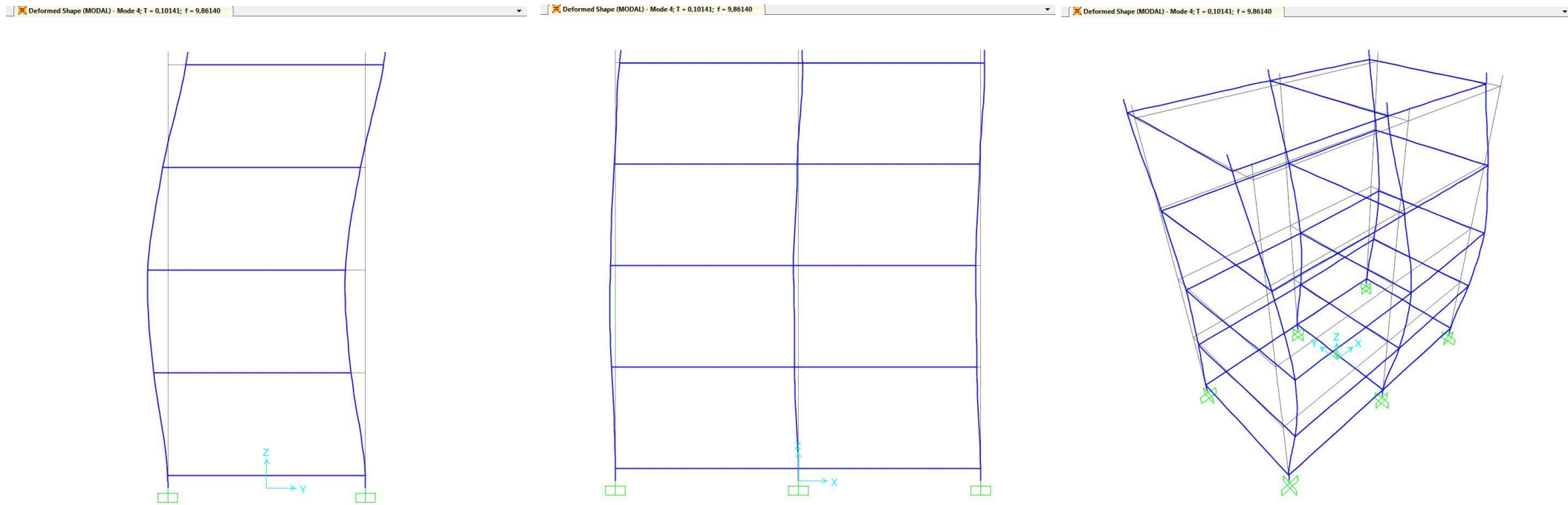
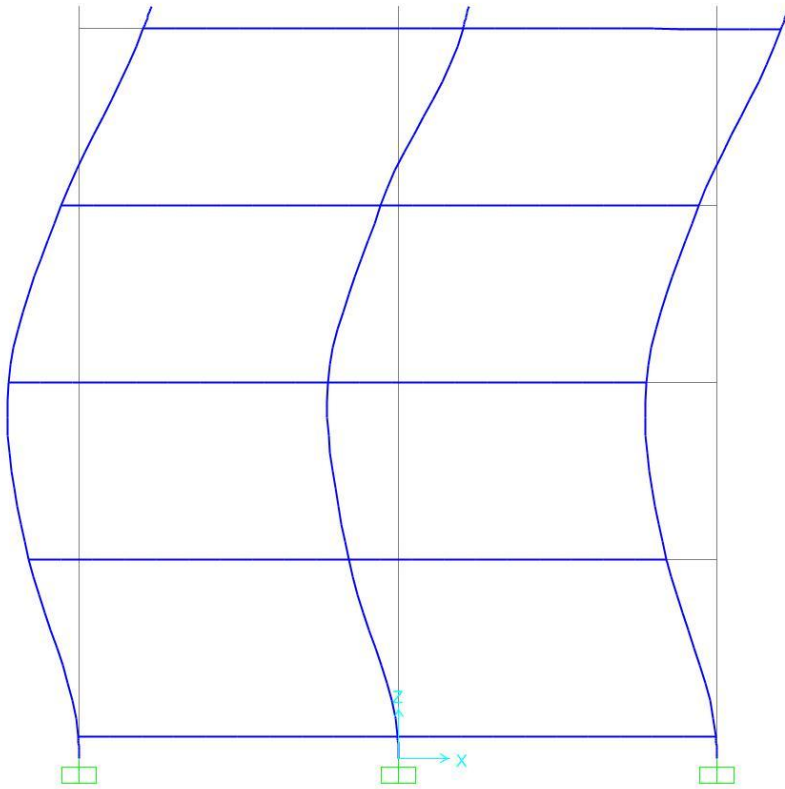


Figura 4.26. Diagramas en 2-D (secciones transversal y longitudinal) y 3-D de deformación en el modo 4.

- *Modo 5: 10.076*

Deformed Shape (MODAL) - Mode 5; T = 0.09924; f = 10.07691



Deformed Shape (MODAL) - Mode 5; T = 0.09924; f = 10.07691

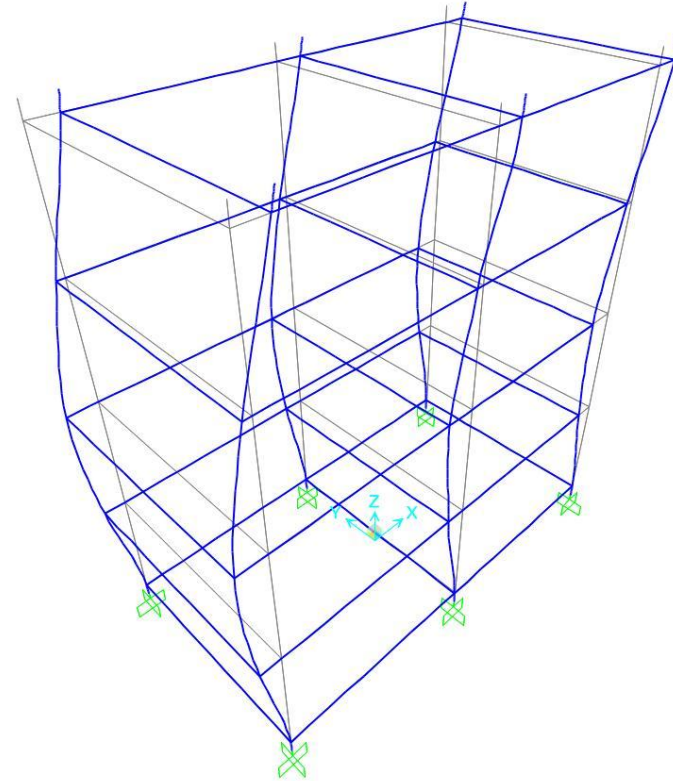


Figura 4.27. Diagramas en 2-D (sección longitudinal) y 3-D de deformación en el modo 5.

- *Modo 6: 12.37*

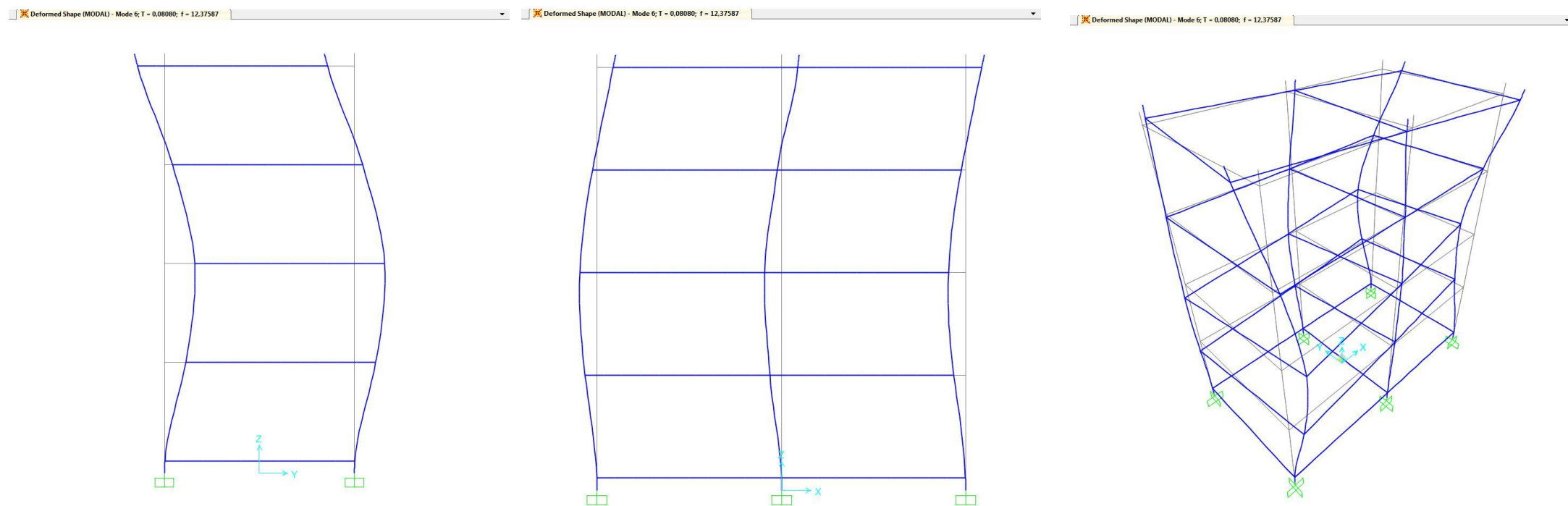


Figura 4.28. Diagramas en 2-D (secciones transversal y longitudinal) y 3-D de deformación en el modo 6.

- Modo 7: 15.072

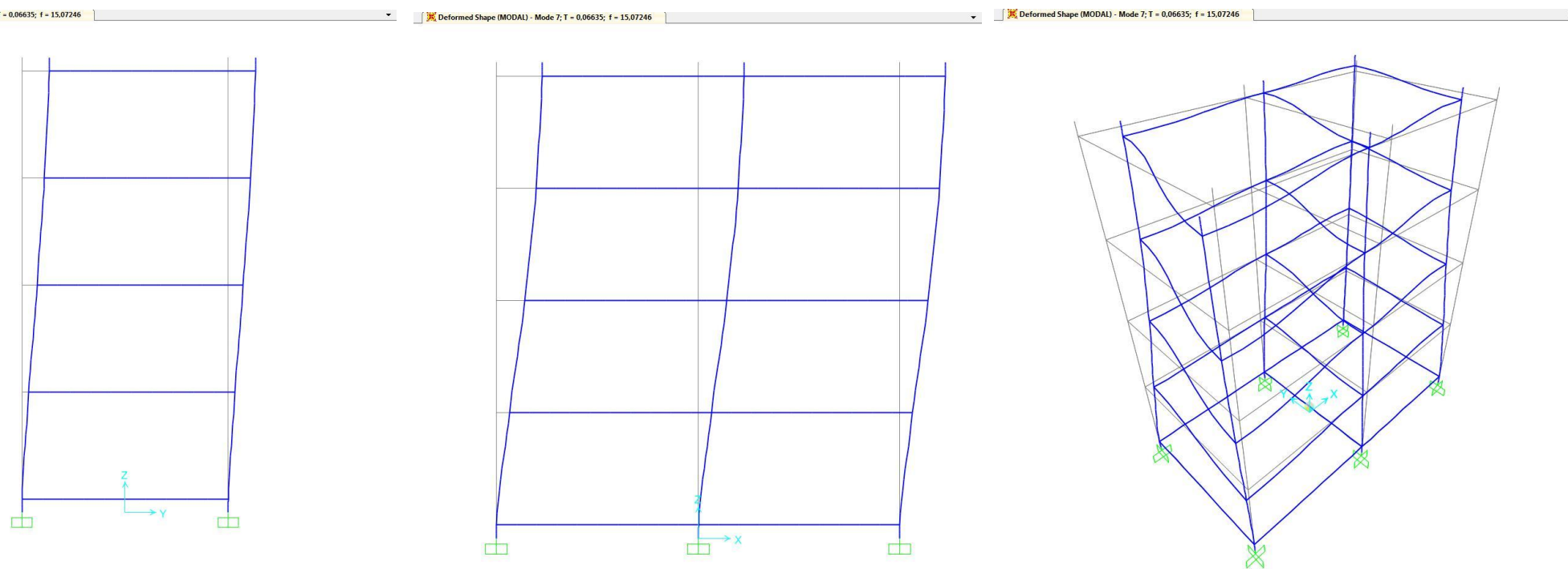


Figura 4.29. Diagramas en 2-D (secciones transversal y longitudinal) y 3-D de deformación en el modo 7.

- *Modo 8: 17.48*

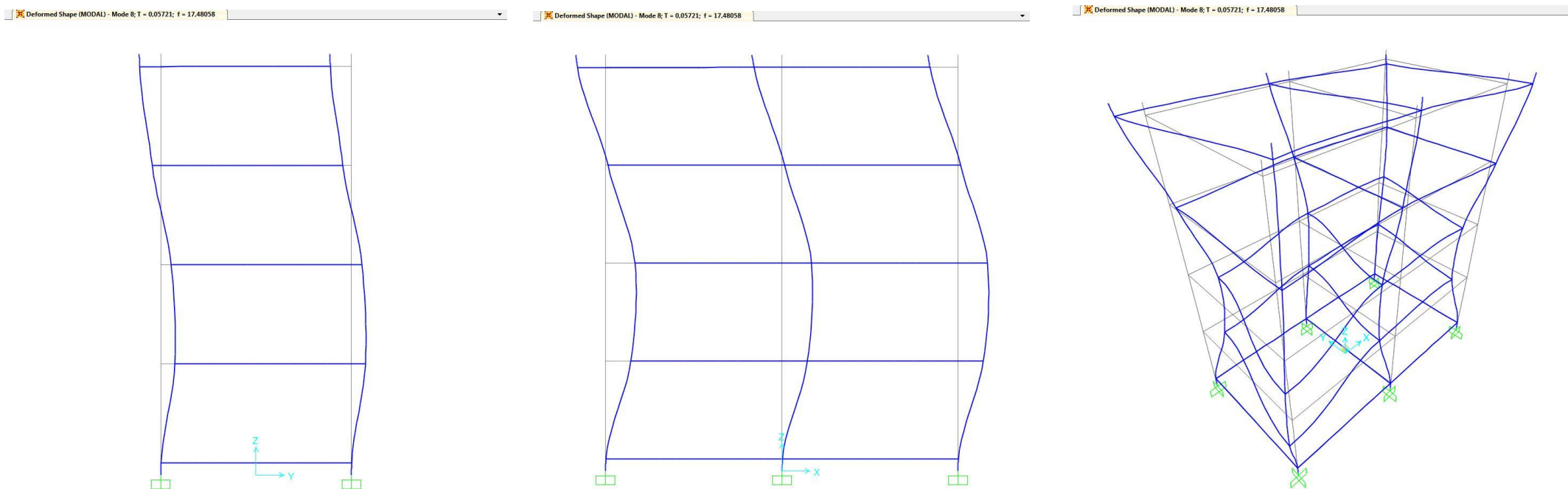


Figura 4.30. Diagramas en 2-D (secciones transversal y longitudinal) y 3-D de deformación en el modo 8.

Resumiendo:

- En el modo 1: la oscilación es transversal tal y como muestra la Figura 4.23.
- En el modo 2: la oscilación es longitudinal tal y como muestra la Figura 4.24.
- En el modo 3: hay un movimiento torsional tal y como muestra la Figura 4.25.
- En el modo 4: hay una flexión longitudinal tal y como muestra en la Figura 4.26.
- En el modo 5: hay una flexión transversal tal y como muestra en la Figura 4.27.
- En el modo 6: hay una flexión en la planta superior (planta 5) y una torsión en toda la estructura, tal y como muestra la Figura 4.28.
- En el modo 7: hay una flexión en toda la estructura entre los nodos diagonales opuestos. La flexión es en dirección transversal a la de golpeo, tal y como muestra la Figura 4.29.
- En el modo 8: Hay una flexión en las plantas 2 y 3 entre los nodos diagonales opuestos y una flexión en la planta 5 en la misma dirección pero sentido opuesto a la de las plantas anteriores. Las plantas 1 y 4 no se deforman, tal y como muestra la Figura 4.30.

Las diferencias entre los modelos articulado y empotrado son las siguientes:

- El modo 4 del modelo articulado es una flexión transversal, mientras que el del empotrado es una longitudinal.
- El modo 5 del modelo articulado es una flexión longitudinal, mientras que el del empotrado es una transversal.
- El modo 6 del modelo articulado es una flexión en toda la estructura, mientras que el del empotrado es una torsión.

El modelo escogido es el articulado ya que se comporta como el ensayo experimental. El modelo empotrado tiene distintos comportamientos en algunos de los modos, por ello queda descartado.

4.2.3 Caso daño aplicado

Una vez escogido el modelo articulado, ya calibrado, se aplicarán los daños del ensayo experimental.

Para aplicar el daño a la estructura se cambian las fijaciones de las uniones viga-estructura. En el caso de los daños puntuales se cambia el momento de fijación parcial a 0. En el caso del daño generalizado será 8.75 KN*m en las uniones columna-vigas transversales y 2.25 KN*m en las longitudinales, ya que en el ensayo experimental se aflojaron los tornillos a la mitad de su par de apriete.

A continuación se presentan las tablas de las frecuencias de cada modo del ensayo experimental y del modelo numérico.

- *Daño aplicado a la viga izquierda de un nodo de la primera planta*

Daño Simple Izquierda			
MODO	Frecuencia SAP	Frecuencia ensayo	% de error
1	2,371	2,422	2,11
2	2,573	2,562	0,43
3	2,985	3,641	18,02
4		7,609	
5	8,747	8,766	0,22
6	9,019	9,219	2,17
7	10,888	12,02	9,42
8	15,026	13,02	15,41
9	17,191	14,2	21,06

Tabla 4.14. Valores de las frecuencias del modelo empotrado en SAP y del ensayo experimental.

- *Daño aplicado a la viga derecha del nodo anterior*

Daño Simple Derecha			
MODO	Frecuencia SAP	Frecuencia ensayo	% de error
1	2,516		
1	2,517	2,531	0,55
2	3,041	3,719	18,23
3		7,594	
4	8,821	8,828	0,08
5	8,985	9,172	2,04
6	10,896	12,2	10,69
7	15,022	13,03	15,29
8	17,166	14,2	20,89
9	17,522	16,78	4,42

Tabla 4.15. Valores de las frecuencias del modelo empotrado en SAP y del ensayo experimental.

- *Daño aplicado a las dos vigas del nodo anterior*

Daño Doble			
MODO	Frecuencia SAP	Frecuencia ensayo	% de error
1	2,37	2,422	2,15
2	2,517	2,547	1,18
3	2,971	3,641	18,40
4		7,594	
5	8,743	8,781	0,43
6	8,984	9,219	2,55
7	10,852	12,02	9,72
8	15,014	13	15,49
9	17,143	14,2	20,73

Tabla 4.16. Valores de las frecuencias del modelo empotrado en SAP y del ensayo experimental.

- *Daño generalizado de toda la primera planta*

Daño Generalizado			
MODO	Frecuencia SAP	Frecuencia ensayo	% de error
1	2,454	2,469	0,61
2	2,49	2,516	1,03
3	2,994	3,687	18,80
4		7,578	
5	8,806	8,766	0,46
6	8,945	9,156	2,30
7	10,899	12,09	9,85
8	15,02	12,94	16,07
9	17,194	14,14	21,60

Tabla 4.17. Valores de las frecuencias del modelo empotrado en SAP y del ensayo experimental.

En todos estos casos la estructura tiene los mismos movimientos en cada modo que en el modelo articulado inicial. El comportamiento de cada nodo se ha explicado en el Capítulo 4.2.1.

En el Anexo C se muestran los diagramas de deformación de la estructura frente a cada daño aplicado.

4.3 Variabilidad frecuencial

En este apartado se presentan y explican los resultados obtenidos de todos los modos de los tipos de daño aplicados en la estructura y las componentes principales obtenidas por el programa SPSS de cada tipo de ensayo.

4.3.1 Modos de los ensayos

A continuación se presentan las tablas frecuencia-temperatura de cada ensayo (Tablas de 4.18 a 4.22) y sus gráficos correspondientes (Figuras de 4.31 a 4.35).

- Daño aplicado a la viga izquierda de un nodo de la primera planta

	TEMPERATURA AMBIENTE													
	30	28	27	26	25	24	22	20	21	18	19	17	16	
	TEMPERATURA ESTRUCTURA													
	28,87	28,31	27,2	25,36	23,88	22,93	22	21,13	20,68	19,18	18,35	17,23	15,2	
Frecuencias	2,422	2,422	2,422	2,422	2,422	2,422	2,422	2,422	2,422	2,422	2,422	2,422	2,437	
	2,562	2,562	2,562	2,578	2,578	2,578	2,578	2,578	2,578	2,578	2,578	2,578	2,578	
	3,641	3,641	3,641	3,641	3,641	3,641	3,656	3,656	3,656	3,656	3,641	3,656	3,656	
	7,609	7,609	7,609	7,609	7,609	7,609	7,609	7,609	7,609	7,609	7,609	7,609	7,609	
	8,75	8,766	8,766	8,766	8,766	8,766	8,781	8,781	8,781	8,781	8,781	8,781	8,781	
	9,219	9,219	9,219	9,219	9,234	9,234	9,234	9,234	9,234	9,234	9,234	9,25	9,25	
	12	12	12,02	12,02	12,02	12,02	12,02	12,03	12,02	12,03	12,02	12,02	12,03	
	13,05	13,03	13,03	13,02	13,02	13,02	13,02	13,02	13,02	12,98	12,98	12,98	12,97	
	14,17	14,19	14,19	14,2	14,2	14,2	14,2	14,22	14,2	14,22	14,22	14,2	14,22	
	16,77	16,78	16,78	16,8	16,81	16,81	16,81	16,83	16,81	16,83	16,81	16,81	16,83	
	17,67	17,66	17,64	17,67	17,7	17,67	17,7	17,69	17,69	17,72	17,77	17,78	17,81	
	18,69	18,67	18,69	18,69	18,69	18,69	18,69	18,69	18,67	18,7	18,69	18,69	18,7	
	19,97	19,97	19,98	19,98	20	20	19,98	20	20	20,02	20,02	20,02	20,02	
	21,05	21,06	21,09	21,08	21,11	21,12	21,11	21,16	21,14	21,14	21,12	21,17	21,19	
	24,31	24,33	24,39	24,37	24,39	24,44	24,44	24,44	24,44	24,48	24,45	24,5	24,55	
	25,33	25,39	25,44	25,47	25,5	25,5	25,52	25,56	25,55	25,52	25,48	25,55	25,58	
	25,66	25,7	25,75	25,81	25,81	25,86	25,91	25,97	25,89	25,92	25,89	25,92	25,94	
	26,2	26,25	26,31	26,34	26,23	26,23	26,28	26,31	26,31	26,28	26,27	26,3	26,3	
	26,84	26,87	26,92	26,94	26,98	27	27,06	27,12	27,09	27,08	27,05	27,09	27,11	
	27,5	27,59	27,62	27,64	27,64	27,66	27,67	27,67	27,66	27,67	27,67	27,69	27,72	

Tabla 4.18. Modos del ensayo a diferentes temperaturas.

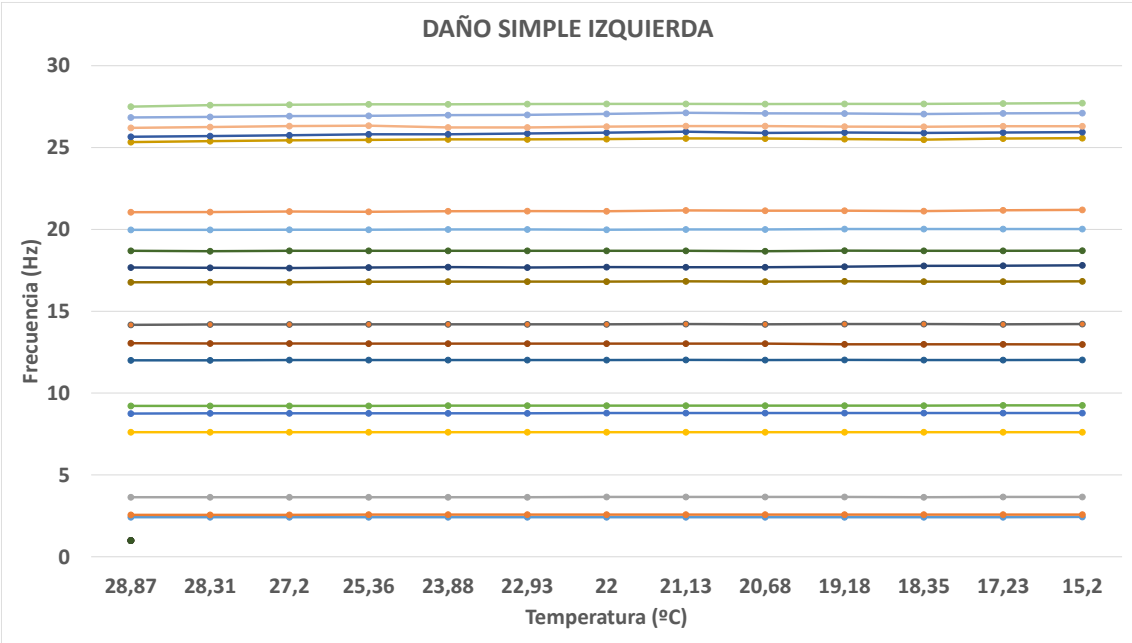


Figura 4.31. Evolución de los modos respecto a la temperatura.

En la Figura 4.31 se observa que a medida que la temperatura aumenta la frecuencia disminuye muy poco. Se ve una disminución más pronunciada en el rango de 25 a 30 Hz. Los modos de 2 a 22 Hz son constantes.

- *Daño aplicado a la viga derecha del nodo anterior*

		TEMPERATURA AMBIENTE							
		30	27	26	22	23	21	19	18
		TEMPERATURA ESTRUCTURA							
Frecuencias		26.44	25.53	23.52	22.44	21.73	20.87	19.15	17.17
	2,531	2,531	2,531	2,531	2,547	2,531	2,547	2,547	2,547
	3,719	3,734	3,734	3,734	3,734	3,734	3,734	3,734	3,734
	7,594	7,609	7,609	7,625	7,609	7,625	7,625	7,625	7,609
	8,828	8,828	8,828	8,828	8,844	8,844	8,844	8,844	8,844
	9,172	9,172	9,172	9,219	9,187	9,219	9,219	9,219	9,187
	12,19	12,2	12,2	12,2	12,22	12,22	12,22	12,22	12,22
	13	13,02	13,03	13,09	13,06	13,05	13,08	13,08	13,03
	14,17	14,19	14,19	14,23	14,2	14,23	14,23	14,23	14,19
	16,77	16,78	16,78	16,77	16,78	16,78	16,78	16,78	16,78
	19,23	19,25	19,27	19,28	19,3	19,28	19,3	19,31	19,31
	21	21,03	21,05	21,06	21,11	21,11	21,14	21,14	21,14
	23,75	23,81	23,84	23,97	23,97	24,03	24,05	23,98	
	24,55	24,56	24,58	24,69	24,61	24,73	24,8	24,86	
	25,45	25,5	25,52	25,45	25,55	25,5	25,56	25,59	
	26,14	26,23	26,25	26,25	26,31	26,3	26,36	26,39	
	26,31	26,39	26,44	26,41	26,53	26,52	26,59	26,66	
	26,89	26,95	26,98	27,05	27,06	27,09	27,16	27,11	
	29,19	29,22	29,22	29,25	29,27	29,27	29,3	29,33	
	29,47	29,45	29,52	29,52	29,5	29,5	29,56	29,58	

Tabla 4.19. Modos del ensayo a diferentes temperaturas.

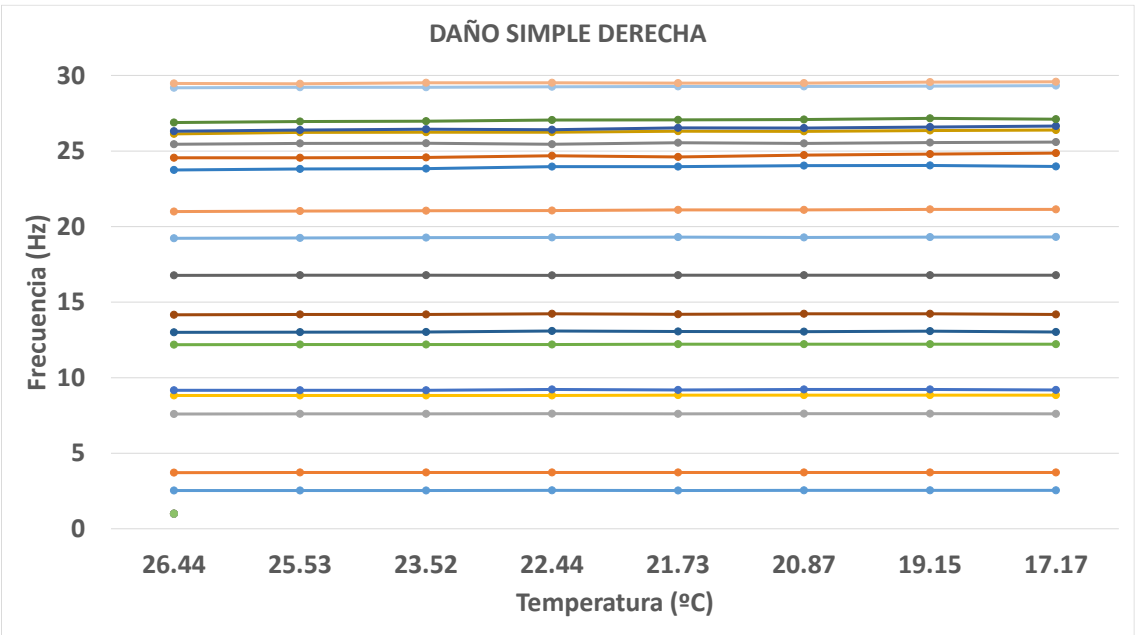


Figura 4.32. Evolución de los modos respecto a la temperatura.

En este daño la estructura responde de la misma forma que con el daño anterior (Figura 4.32). La frecuencia disminuye muy poco a medida que la temperatura aumenta. En el rango de 2 a 18 Hz los valores son constantes.

- Daño aplicado a las dos vigas del nodo anterior

	TEMPERATURA AMBIENTE									
	30	29	25	24	22	19	18	17	15	
	TEMPERATURA ESTRUCTURA									
	28,97	27,67	26,06	24,48	23,5	20,51	18,77	17,48	14,17	
Frecuencias	2,422	2,437	2,422	2,422	2,422	2,453	2,453	2,453	2,437	
	2,531	2,547	2,547	2,547	2,547	2,547	2,547	2,547	2,562	
	3,625	3,656	3,641	3,641	3,641	3,656	3,656	3,856	3,656	
	7,594	7,625	7,594	7,594	7,594	7,594	7,594	7,594	7,578	
	8,75	8,781	8,766	8,766	8,781	8,781	8,797	8,797	8,781	
	9,187	9,219	9,219	9,219	9,219	9,203	9,219	9,219	9,234	
	11,98	12,06	12,02	12,02	12	12,08	12,08	12,08	12,02	
	13,08	13,05	13,02	12,98	13	13	12,97	12,95	12,94	
	14,17	14,22	14,2	14,2	14,19	14,22	14,2	14,2	14,19	
	16,64	16,73	16,75	16,77	16,77	16,75	16,75	16,75	16,77	
	17,67	17,64	17,66	17,62	17,61	17,44	17,48	17,42	17,56	
	20,97	20,98	20,95	21,02	21,02	21	21,02	21,02	21,05	
	23,64	23,73	23,87	23,95	23,98	23,97	23,84	23,84	23,95	
	24,44	24,45	24,53	24,52	24,55	24,48	24,45	24,52	24,53	
	25,27	25,34	25,41	25,47	25,5	25,47	25,5	25,53	25,53	
	25,48	25,56	25,67	25,75	25,8	25,73	25,75	25,77	25,77	
	26,77	26,8	26,87	26,98	27,09	27,02	27,17	27,19	27,3	
		29,02	29,08	29,12	29,16	29,25	29,19	29,19	29,22	29,27

Tabla 4.20. Modos del ensayo a diferentes temperaturas.

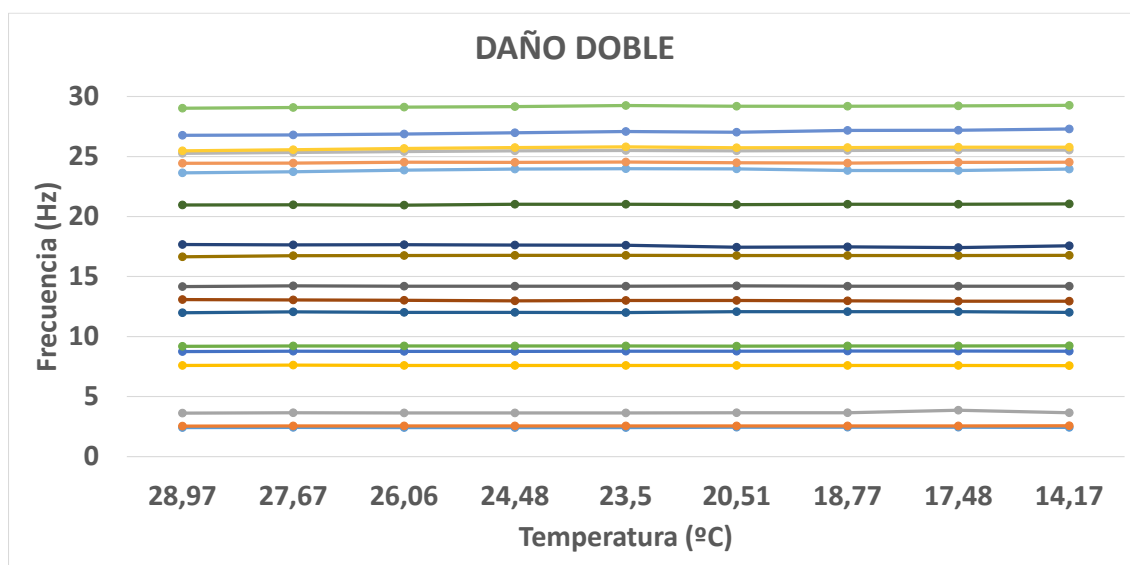


Figura 4.33. Evolución de los modos respecto a la temperatura.

En la Figura 4.33 la variación de temperatura afecta más a los modos de 23 a 30 Hz, que al aumentar la temperatura disminuye la frecuencia. El resto son constantes. Los dos primeros modos de 0 a 5 Hz tienen una disminución muy ligera a medida que se aumenta la temperatura.

- Daño generalizado de toda la primera planta

		TEMPERATURA AMBIENTE					
		29	27	25	24	21	19
		TEMPERATURA ESTRUCTURA					
		26.54	25.73	24.55	23.44	21.84	19.96
Frecuencias		2,469	2,469	2,469	2,469	2,469	2,469
		2,516	2,516	2,516	2,516	2,516	2,531
		3,687	3,687	3,687	3,687	3,687	3,687
		7,578	7,578	7,578	7,578	7,562	7,578
		8,766	8,766	8,781	8,781	8,766	8,797
		9,156	9,156	9,172	9,172	9,172	9,187
		12,09	12,09	12,09	12,1	12,09	12,11
		12,94	12,92	12,92	12,94	12,92	12,89
		14,14	14,12	14,12	14,14	14,14	14,16
		16,66	16,66	16,67	16,67	16,67	16,69
		17,89	17,87	17,8	17,84	17,94	17,83
		18,77	18,8	18,73	18,77	18,72	18,73
		20,91	20,92	20,92	20,92	20,94	20,93
		22,33	22,33	22,31	22,33	22,33	22,37
		22,78	22,78	22,8	22,81	22,86	22,86
		23,53	23,53	23,55	23,56	23,56	23,48
		24,08	24,09	24,09	24,12	24,12	24,16
		25,72	25,73	25,73	25,77	25,81	25,84
		26,83	26,84	26,84	26,87	26,94	27,02
		28,78	28,78	28,8	28,86	28,81	28,83
		29,02	29,02	29,05	29,06	29,05	29,06

Tabla 4.21. Modos del ensayo a diferentes temperaturas.

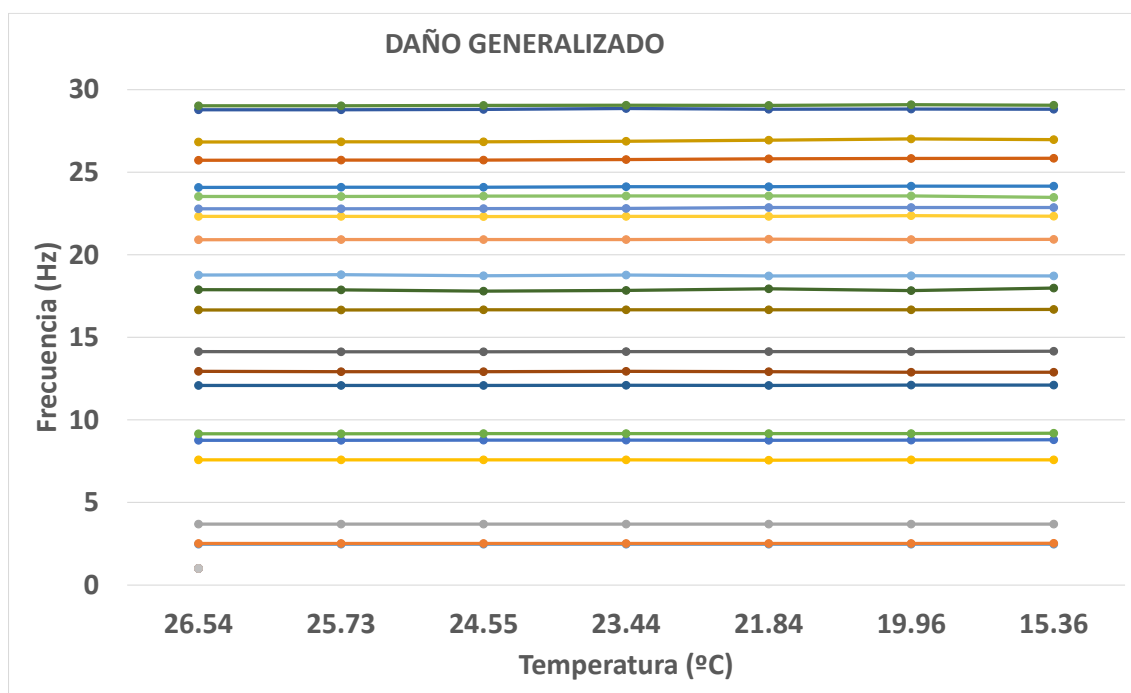


Figura 4.34. Evolución de los modos respecto a la temperatura.

En la Figura 4.34 se observa una leve disminución de frecuencia a medida que se aumenta la temperatura en los primeros (de 0 a 8 Hz) y últimos modos (de 22 a 30 Hz). Los modos centrales son prácticamente constantes ante la variación de temperatura.

- Sin daño aplicado

	TEMPERATURA AMBIENTE										POSICIÓN INVERSA	
	30	29	27	26	24	23	22	21	19	18		
	TEMPERATURA ESTRUCTURA											23
	29.20	27.94	26.03	25.40	24.89	22.98	22.67	21.56	18.83	17.17		24.06
FRECUENCIAS	2,516	2,516	2,516	2,516	2,516	2,516	2,516	2,516	2,516	2,516	2,516	
	2,578	2,578	2,578	2,578	2,578	2,578	2,578	2,578	2,578	2,578	2,578	
	3,734	3,734	3,734	3,734	3,734	3,75	3,75	3,75	3,75	3,75	3,734	
	7,641	7,641	7,641	7,641	7,641	7,656	7,656	7,656	7,656	7,656	7,641	
	8,844	8,844	8,844	8,859	8,844	8,859	8,859	8,859	8,859	8,859	8,844	
	9,219	9,219	9,234	9,234	9,219	9,234	9,234	9,234	9,234	9,25	9,234	
	12,23	12,23	12,23	12,25	12,23	12,25	12,25	12,25	12,25	12,27	12,28	
	13,03	13,03	13,02	13,03	13,02	13,03	13,05	13,05	13,05	13,02	13,05	
	14,31	14,31	14,3	14,31	14,3	14,3	14,31	14,31	14,31	14,33	14,36	
	16,89	16,86	16,87	16,91	16,89	16,87	16,91	16,91	16,91	16,92	16,94	
	19,27	19,27	19,28	19,28	19,27	19,3	19,3	19,3	19,3	19,3	19,33	
	21,11	21,11	21,12	21,16	21,12	21,14	21,16	21,17	21,17	21,17	21,12	
	23,69	23,72	23,77	23,8	23,73	23,72	23,73	23,75	23,75	23,8	23,73	
	24,58	24,59	24,67	24,7	24,66	24,66	24,69	24,7	24,75	24,75	24,69	
	25,41	25,47	25,52	25,55	25,47	25,41	25,42	25,48	25,53	25,53	25,58	
	26,03	26,09	26,19	26,2	26,17	26,2	26,23	26,3	26,36	26,36	26,4	
	26,31	26,31	26,37	26,42	26,37	26,39	26,41	26,53	26,59	26,59	26,61	
	26,94	26,97	27,03	27,06	27	27,05	27,08	27,12	27,16	27,16	27,22	
	29,19	29,17	29,25	29,31	29,27	29,28	29,31	29,33	29,39	29,39	29,41	
	29,44	29,47	29,5	29,5	29,55	29,53	29,52	29,58	29,59	29,59	29,67	
	29,75	29,78	29,87	29,86	29,81	29,83	29,89	29,86	29,94	29,94	29,83	

Tabla 4.22. Modos del ensayo a diferentes temperaturas y a temperatura ambiente con la posición invertida de los acelerómetros.

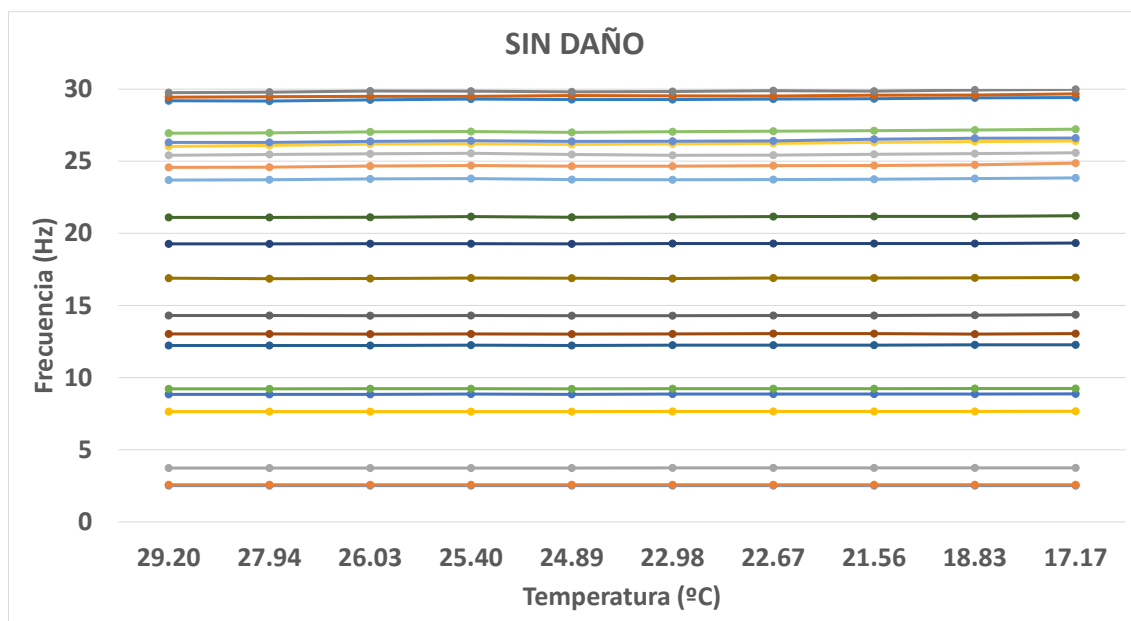


Figura 4.35. Evolución de los modos respecto a la temperatura.

En la Figura 4.35 los valores son constantes al variar la temperatura. En los últimos modos (de 25 a 30 Hz) se aprecia una ligera bajada de frecuencia a medida que la temperatura aumenta.

Se puede concluir que al aplicar un daño, ya sea puntual o general en una planta de la estructura, los modos son constantes al variar la temperatura. Pero puede haber una ligera disminución de la frecuencia al aumentar la temperatura en los primeros y últimos modos. Los modos centrales son constantes.

4.3.2 Componentes principales

Tal y como se ha explicado en el Capítulo 3.6, para el estudio de componentes principales antes de introducir los datos en el programa deben eliminarse las variables constantes, que son las que en el tiempo han variado menos de $2\Delta f$. Así se evita introducir ruido producido por las frecuencias que en los ensayos no han variado ante el cambio de temperatura.

A continuación se presentan las tablas introducidas en el programa SPSS (Tablas de 4.23 a 4.27). Éstas contienen los valores de frecuencias respecto a temperaturas. Las columnas de color amarillo representan los modos que se han eliminado previamente al cálculo en el programa.

- Daño aplicado a la viga izquierda de un nodo de la primera planta

	mode 1	mode 2	mode 3	mode 4	mode 5	mode 6	mode 7	mode 8	mode 9	mode 10	mode 11	mode 12	mode 13	mode 14	mode 15	mode 16	mode 17	mode 18	mode 19	mode 20
28,87	2,422	2,562	3,641	7,609	8,75	9,219	12	13,05	14,17	16,77	17,67	18,69	19,97	21,05	24,31	25,33	25,66	26,2	26,84	27,5
28,31	2,422	2,562	3,641	7,609	8,766	9,219	12	13,03	14,19	16,78	17,66	18,67	19,97	21,06	24,33	25,39	25,7	26,25	26,87	27,59
27,2	2,422	2,562	3,641	7,609	8,766	9,219	12,02	13,03	14,19	16,78	17,64	18,69	19,98	21,09	24,39	25,44	25,75	26,31	26,92	27,62
25,36	2,422	2,578	3,641	7,609	8,766	9,219	12,02	13,02	14,2	16,8	17,67	18,69	19,98	21,08	24,37	25,47	25,81	26,34	26,94	27,64
23,88	2,422	2,578	3,641	7,609	8,766	9,234	12,02	13,02	14,2	16,81	17,7	18,69	20	21,11	24,39	25,5	25,81	26,23	26,98	27,64
22,93	2,422	2,578	3,641	7,609	8,766	9,234	12,02	13,02	14,2	16,81	17,67	18,69	20	21,12	24,44	25,5	25,86	26,23	27	27,66
22	2,422	2,578	3,656	7,609	8,781	9,234	12,02	13,02	14,2	16,81	17,7	18,69	19,98	21,11	24,44	25,52	25,91	26,28	27,06	27,67
21,13	2,422	2,578	3,656	7,609	8,781	9,234	12,03	13,02	14,22	16,83	17,69	18,69	20	21,16	24,44	25,56	25,97	26,31	27,12	27,67
20,68	2,422	2,578	3,656	7,609	8,781	9,234	12,02	13,02	14,2	16,81	17,69	18,67	20	21,14	24,44	25,55	25,89	26,31	27,09	27,66
19,18	2,422	2,578	3,656	7,609	8,781	9,234	12,03	12,98	14,22	16,83	17,72	18,7	20,02	21,14	24,48	25,52	25,92	26,28	27,08	27,67
18,35	2,422	2,578	3,641	7,609	8,781	9,234	12,02	12,98	14,22	16,81	17,77	18,69	20,02	21,12	24,45	25,48	25,89	26,27	27,05	27,67
17,23	2,422	2,578	3,656	7,609	8,781	9,25	12,02	12,98	14,2	16,81	17,78	18,69	20,02	21,17	24,5	25,55	25,92	26,3	27,09	27,69
15,2	2,437	2,578	3,656	7,609	8,781	9,25	12,03	12,97	14,22	16,83	17,81	18,7	20,02	21,19	24,55	25,58	25,94	26,3	27,11	27,72

Tabla 4.23. Modos del ensayo de daño simple izquierda.

En este ensayo se eliminan 12 modos de 20 totales (Tabla 4.23). Los 8 restantes son los que se introducirán en el programa para calcular las componentes principales.

- Daño aplicado a la viga derecha del nodo anterior

	mode 1	mode 2	mode 3	mode 4	mode 5	mode 6	mode 7	mode 8	mode 9	mode 10	mode 11	mode 12	mode 13	mode 14	mode 15	mode 16	mode 17	mode 18	mode 19
26,44	2,531	3,719	7,594	8,828	9,172	12,19	13	14,17	16,77	19,23	21	23,75	24,55	25,45	26,14	26,31	26,89	29,19	29,47
25,53	2,531	3,734	7,609	8,828	9,172	12,2	13,02	14,19	16,78	19,25	21,03	23,81	24,56	25,5	26,23	26,39	26,95	29,22	29,45
23,52	2,531	3,734	7,609	8,828	9,172	12,2	13,03	14,19	16,78	19,27	21,05	23,84	24,58	25,52	26,25	26,44	26,98	29,22	29,52
22,44	2,547	3,734	7,625	8,828	9,219	12,2	13,09	14,23	16,77	19,28	21,06	23,97	24,69	25,45	26,25	26,41	27,05	29,25	29,52
21,73	2,531	3,734	7,609	8,844	9,187	12,22	13,06	14,2	16,78	19,3	21,11	23,97	24,61	25,55	26,31	26,53	27,06	29,27	29,5
20,87	2,547	3,734	7,625	8,844	9,219	12,22	13,05	14,23	16,78	19,28	21,11	24,03	24,73	25,5	26,3	26,52	27,09	29,27	29,5
19,15	2,547	3,734	7,625	8,844	9,219	12,22	13,08	14,23	16,78	19,3	21,14	24,05	24,8	25,56	26,36	26,59	27,16	29,3	29,56
17,17	2,547	3,734	7,609	8,844	9,187	12,22	13,03	14,19	16,78	19,31	21,14	23,98	24,86	25,59	26,39	26,66	27,11	29,33	29,58

Tabla 4.24. Modos del ensayo de daño simple derecha.

En este ensayo se eliminan 13 modos de 19 totales (Tabla 4.24). Los 6 restantes son los que se introducirán en el programa para calcular las componentes principales.

- Daño aplicado a las dos vigas del nodo anterior

	mode 1	mode 2	mode 3	mode 4	mode 5	mode 6	mode 7	mode 8	mode 9	mode 10	mode 11	mode 12	mode 13	mode 14	mode 15	mode 16	mode 17	mode 18
28,97	2,422	2,531	3,625	7,594	8,75	9,187	11,98	13,08	14,17	16,64	17,67	20,97	23,64	24,44	25,27	25,48	26,77	29,02
27,67	2,437	2,547	3,656	7,625	8,781	9,219	12,06	13,05	14,22	16,73	17,64	20,98	23,73	24,45	25,34	25,56	26,8	29,08
26,06	2,422	2,547	3,641	7,594	8,766	9,219	12,02	13,02	14,2	16,75	17,66	20,95	23,87	24,53	25,41	25,67	26,87	29,12
24,48	2,422	2,547	3,641	7,594	8,766	9,219	12,02	12,98	14,2	16,77	17,62	21,02	23,95	24,52	25,47	25,75	26,98	29,16
23,5	2,422	2,547	3,641	7,594	8,781	9,219	12	13	14,19	16,77	17,61	21,02	23,98	24,55	25,5	25,8	27,09	29,25
20,51	2,453	2,547	3,656	7,594	8,781	9,203	12,08	13	14,22	16,75	17,44	21	23,97	24,48	25,47	25,73	27,02	29,19
18,77	2,453	2,547	3,656	7,594	8,797	9,219	12,08	12,97	14,2	16,75	17,48	21,02	23,84	24,45	25,5	25,75	27,17	29,19
17,48	2,453	2,547	3,856	7,594	8,797	9,219	12,08	12,95	14,2	16,75	17,42	21,02	23,84	24,52	25,53	25,77	27,19	29,22
14,17	2,437	2,562	3,656	7,578	8,781	9,234	12,02	12,94	14,19	16,77	17,56	21,05	23,95	24,53	25,53	25,77	27,3	29,27

Tabla 4.25. Modos del ensayo de daño doble.

En este ensayo se eliminan 12 modos de 18 totales (Tabla 4.25). Los 6 restantes son los que se introducirán en el programa para calcular las componentes principales.

- *Daño generalizado de toda la primera planta*

	mode 1	mode 2	mode 3	mode 4	mode 5	mode 6	mode 7	mode 8	mode 9	mode 10	mode 11	mode 12	mode 13	mode 14	mode 15	mode 16	mode 17	mode 18	mode 19	mode 20	mode 21
26.54	2,469	2,516	3,687	7,578	8,766	9,156	12,09	12,94	14,14	16,66	17,89	18,77	20,91	22,33	22,78	23,53	24,08	25,72	26,83	28,78	29,02
25.73	2,469	2,516	3,687	7,578	8,766	9,156	12,09	12,92	14,12	16,66	17,87	18,8	20,92	22,33	22,78	23,53	24,09	25,73	26,84	28,78	29,02
24.55	2,469	2,516	3,687	7,578	8,781	9,172	12,09	12,92	14,12	16,67	17,8	18,73	20,92	22,31	22,8	23,55	24,09	25,73	26,84	28,8	29,05
23.44	2,469	2,516	3,687	7,578	8,781	9,172	12,1	12,94	14,14	16,67	17,84	18,77	20,92	22,33	22,81	23,56	24,12	25,77	26,87	28,86	29,06
21.84	2,469	2,516	3,687	7,562	8,766	9,172	12,09	12,92	14,14	16,67	17,94	18,72	20,94	22,33	22,86	23,56	24,12	25,81	26,94	28,81	29,05
19.96	2,469	2,516	3,687	7,578	8,781	9,172	12,11	12,89	14,14	16,67	17,83	18,73	20,92	22,37	22,86	23,56	24,16	25,83	27,02	28,83	29,09
15.36	2,469	2,531	3,687	7,578	8,797	9,187	12,11	12,89	14,16	16,69	17,98	18,72	20,93	22,34	22,86	23,48	24,16	25,84	26,97	28,81	29,06

Tabla 4.26. Modos del ensayo de daño generalizado.

En este ensayo se eliminan 12 modos de 21 totales (Tabla 4.26). Los 9 restantes son los que se introducirán en el programa para calcular las componentes principales.

- *Sin daño aplicado*

	mode 1	mode 2	mode 3	mode 4	mode 5	mode 6	mode 7	mode 8	mode 9	mode 10	mode 11	mode 12	mode 13	mode 14	mode 15	mode 16	mode 17	mode 18	mode 19	mode 20	mode 21
29.20	2,516	2,578	3,734	7,641	8,844	9,219	12,23	13,03	14,31	16,89	19,27	21,11	23,69	24,58	25,41	26,03	26,31	26,94	29,19	29,44	29,75
27.94	2,516	2,578	3,734	7,641	8,844	9,219	12,23	13,03	14,31	16,86	19,27	21,11	23,72	24,59	25,47	26,09	26,31	26,97	29,17	29,47	29,78
26.03	2,516	2,578	3,734	7,641	8,844	9,234	12,23	13,02	14,3	16,87	19,28	21,12	23,77	24,67	25,52	26,19	26,37	27,03	29,25	29,5	29,87
25.40	2,516	2,578	3,734	7,641	8,859	9,234	12,25	13,03	14,31	16,91	19,28	21,16	23,8	24,7	25,55	26,2	26,42	27,06	29,31	29,5	29,86
24.89	2,516	2,578	3,734	7,641	8,844	9,219	12,23	13,02	14,3	16,89	19,27	21,12	23,73	24,66	25,47	26,17	26,37	27	29,27	29,55	29,81
24.06	2,516	2,578	3,734	7,641	8,844	9,234	12,23	13,03	14,3	16,89	19,25	21,12	23,73	24,69	25,48	26,17	26,37	27,02	29,25	29,55	29,83
22.98	2,516	2,578	3,75	7,656	8,859	9,234	12,25	13,03	14,3	16,87	19,3	21,14	23,72	24,66	25,41	26,2	26,39	27,05	29,28	29,53	29,83
22.67	2,516	2,578	3,75	7,656	8,859	9,234	12,25	13,05	14,31	16,91	19,3	21,16	23,73	24,69	25,42	26,23	26,41	27,08	29,31	29,52	29,89
21.56	2,516	2,578	3,75	7,656	8,859	9,234	12,25	13,05	14,31	16,91	19,3	21,17	23,75	24,7	25,48	26,3	26,53	27,12	29,33	29,58	29,86
18.83	2,516	2,578	3,75	7,656	8,859	9,25	12,27	13,02	14,33	16,92	19,3	21,17	23,8	24,75	25,53	26,36	26,59	27,16	29,39	29,59	29,94
17.17	2,516	2,578	3,75	7,672	8,875	9,25	12,28	13,05	14,36	16,94	19,33	21,22	23,84	24,86	25,58	26,4	26,61	27,22	29,41	29,67	29,98

Tabla 4.27. Modos del ensayo sin daño aplicado.

En este ensayo se eliminan 14 modos de 21 totales (Tabla 4.27). Los 7 restantes son los que se introducirán en el programa para calcular las componentes principales.

Después de haber introducido en el programa las tablas filtradas y las características para el cálculo (mencionadas en el Capítulo 3.5), se presentan a continuación los resultados obtenidos.

Al trabajar con datos de un ensayo experimental, en el que hay errores, se considera que la varianza mínima es de 90% ya que el 10% restante es del error experimental anteriormente dicho y se elimina ya que son datos redundantes.

Los valores en color rojo de las tablas siguientes (Tablas de 4.28 a 4.32) representan las varianzas escogidas.

- *Daño aplicado a la viga izquierda de un nodo de la primera planta*

Varianza total explicada

Componente	Sumas de las saturaciones al cuadrado de la extracción			Suma de las saturaciones al cuadrado de la rotación
	Total	% de la varianza	% acumulado	Total
1	.033	87.132	87.132	.022
Bruta 2	.002	5.927	93.059	.009
3	.001	3.098	96.157	.004

Reescalada	4	.001	1.472	97.629	.002
	5	.000	.965	98.594	.001
	6	.000	.669	99.263	.000
	7	.000	.318	99.581	.000
	8	8.623E-005	.226	99.807	.000
	9	3.457E-005	.091	99.898	.000
	10	3.129E-005	.082	99.980	.000
	1	9.195	76.628	76.628	5.139
	2	1.172	9.764	86.393	3.538
	3	.618	5.152	91.545	1.407
	4	.192	1.597	93.142	1.268
	5	.285	2.374	95.516	.216
	6	.075	.628	96.143	.192
	7	.271	2.260	98.404	.087
	8	.048	.401	98.805	.070
	9	.045	.371	99.176	.047
	10	.082	.687	99.863	.019

Tabla 4.28. Varianza total explicada del ensayo de daño simple izquierda.

En este caso se han escogido los 2 primeros valores principales (Tabla 4.28). La elección ha dependido del valor del porcentaje de la varianza y del acumulado. Cuando los valores del porcentaje de la varianza en dos componentes consecutivas no varían mucho, se ha escogido el primero de éstos y el resto se han eliminado porque prácticamente no afectan al porcentaje del acumulado.

Al llegar a la segunda componente la varianza explicada es del 5.9% y la varianza acumulada es el 93%.

- Daño aplicado a la viga derecha del nodo anterior

Varianza total explicada

Componente	Autovalores iniciales ^a			Sumas de las saturaciones al cuadrado de la extracción
	Total	% de la varianza	% acumulado	Total
1	.056	86.583	86.583	.056
2	.005	7.777	94.360	.005
3	.003	4.237	98.596	.003
4	.001	.816	99.412	.001
5	.000	.286	99.698	.000
6	.000	.211	99.909	.000
Bruta 7	5.957E-005	.091	100.000	5.957E-005
8	1.424E-018	2.187E-015	100.000	1.424E-018
9	6.015E-019	9.238E-016	100.000	6.015E-019
10	-8.946E-020	-1.374E-016	100.000	8.946E-020
11	-2.962E-019	-4.548E-016	100.000	
12	-9.701E-019	-1.490E-015	100.000	
13	-8.931E-018	-1.372E-014	100.000	
1	.056	86.583	86.583	9.700
2	.005	7.777	94.360	2.288
3	.003	4.237	98.596	.464
4	.001	.816	99.412	.336
Reescalada 5	.000	.286	99.698	.081
6	.000	.211	99.909	.093
7	5.957E-005	.091	100.000	.039
8	1.424E-018	2.187E-015	100.000	9.977E-016

9	6.015E-019	9.238E-016	100.000	6.527E-016
10	-8.946E-020	-1.374E-016	100.000	6.257E-017
11	-2.962E-019	-4.548E-016	100.000	
12	-9.701E-019	-1.490E-015	100.000	
13	-8.931E-018	-1.372E-014	100.000	

Tabla 4.29. Varianza total explicada del ensayo de daño simple derecha.

En este segundo caso se han escogido las 2 primeras componentes principales (Tabla 4.29). Ésta última explica un 7.7% de varianza y un 94.36% del acumulado, ajustando mucho la variabilidad del conjunto de datos.

- Daño aplicado a las dos vigas del nodo anterior

Varianza total explicada

Componente	Sumas de las saturaciones al cuadrado de la extracción			Suma de las saturaciones al cuadrado de la rotación
	Total	% de la varianza	% acumulado	Total
1	.073	80.435	80.435	.033
2	.010	11.389	91.824	.030
3	.005	5.482	97.306	.016
4	.001	1.091	98.397	.008
5	.001	.723	99.121	.001
6	.000	.376	99.497	.001
7	.000	.322	99.819	.002
8	.000	.181	100.000	.001
9	3.559E-018	3.903E-015	100.000	5.577E-018
10	5.081E-019	5.573E-016	100.000	3.910E-018
1	7.952	66.270	66.270	4.318
2	1.521	12.671	78.941	3.075
3	1.045	8.709	87.651	2.357

4	.440	3.667	91.318	1.537
5	.470	3.916	95.234	.352
6	.201	1.676	96.910	.200
7	.207	1.722	98.632	.097
8	.164	1.368	100.000	.064
9	1.210E-015	1.008E-014	100.000	5.898E-016
10	9.625E-016	8.021E-015	100.000	5.370E-016

Tabla 4.30. Varianza total explicada del ensayo de daño doble.

En el daño doble se han escogido las 2 primeras componentes principales (Tabla 4.30). Éste último explica un 11.389% de varianza y un 1.824% de la acumulada, ajustando mucho la variabilidad del conjunto de datos.

- *Daño generalizado de toda la primera planta*

Varianza total explicada

Componente	Autovalores iniciales ^a			Suma de las saturaciones al cuadrado de la rotación
	Total	% de la varianza	% acumulado	Total
1	.013	67.449	67.449	.006
2	.004	22.045	89.494	.004
3	.001	4.013	93.507	.005
4	.001	3.565	97.072	.002
5	.000	2.426	99.498	.001
Bruta 6	9.525E-005	.502	100.000	.000
7	8.812E-020	4.646E-016	100.000	2.331E-019
8	1.426E-020	7.521E-017	100.000	3.693E-019
9	-3.932E-020	-2.073E-016	100.000	4.003E-019
10	-3.170E-019	-1.671E-015	100.000	7.183E-020
11	-5.134E-019	-2.707E-015	100.000	

Reescalada	12	-2.834E-018	-1.494E-014	100.000	
	1	.013	67.449	67.449	3.756
	2	.004	22.045	89.494	2.715
	3	.001	4.013	93.507	2.095
	4	.001	3.565	97.072	1.973
	5	.000	2.426	99.498	1.190
	6	9.525E-005	.502	100.000	.271
	7	8.812E-020	4.646E-016	100.000	3.582E-016
	8	1.426E-020	7.521E-017	100.000	3.067E-016
	9	-3.932E-020	-2.073E-016	100.000	1.873E-016
	10	-3.170E-019	-1.671E-015	100.000	1.566E-017
	11	-5.134E-019	-2.707E-015	100.000	
	12	-2.834E-018	-1.494E-014	100.000	

Tabla 4.31. Varianza total explicada del ensayo de daño generalizado.

En el daño generalizado se han escogido las 3 primeras componentes principales (Tabla 4.31). Ésta última con un 4.013% de varianza y un 93.507% del acumulado, ajustando mucho la variabilidad de los datos.

- Sin daño aplicado

Varianza total explicada

Componente	Autovalores iniciales ^a		
	Total	% de la varianza	% acumulado
1	.052	90.168	90.168
2	.003	4.499	94.667
3	.001	1.698	96.365
Bruta 4	.001	1.474	97.839
5	.001	1.007	98.846
6	.000	.627	99.473
7	.000	.280	99.752

	8	8.026E-005	.140	99.893
	9	4.137E-005	.072	99.965
	10	2.009E-005	.035	100.000
	11	6.436E-019	1.125E-015	100.000
	12	-1.556E-019	-2.720E-016	100.000
	13	-9.072E-019	-1.586E-015	100.000
	14	-1.662E-018	-2.904E-015	100.000
	1	.052	90.168	90.168
	2	.003	4.499	94.667
	3	.001	1.698	96.365
	4	.001	1.474	97.839
	5	.001	1.007	98.846
	6	.000	.627	99.473
	7	.000	.280	99.752
Reescalada	8	8.026E-005	.140	99.893
	9	4.137E-005	.072	99.965
	10	2.009E-005	.035	100.000
	11	6.436E-019	1.125E-015	100.000
	12	-1.556E-019	-2.720E-016	100.000
	13	-9.072E-019	-1.586E-015	100.000
	14	-1.662E-018	-2.904E-015	100.000

Tabla 4.32. Varianza total explicada del ensayo sin daño aplicado.

En este último caso del ensayo sin daño aplicado, se ha escogido solo una componente principal (Tabla 4.32). Éste ya explica el 90.168% del acumulado.

En resumen, los ensayos en los que se ha generado un daño en la estructura necesitan más componentes principales para representar la reducción de dimensionalidad del conjunto de datos sin redundancias, como en los tres primeros ensayos con daño (que son daños puntuales en la estructura). En el caso de daño general en una planta el valor de la primera componente es menor que en las de los otros ensayos y la segunda componente tiene un valor mucho mayor. Por tanto, el grado de daño afecta al porcentaje de la varianza explicada. A mayor daño, la

varianza de la primera componente se reduce y la de la segunda aumenta, así se necesitan más componentes para representar la reducción de dimensionalidad del conjunto de los datos.

En el ensayo sin daño aplicado únicamente ha sido suficiente una componente para representar casi la totalidad de las dimensiones del conjunto de datos.

Por tanto en los resultados del análisis de componentes principales se obtienen las causas de la variabilidad frecuencial.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

La evaluación del grado de daño de las estructuras se ha realizado mediante un análisis de los modos de la estructura, efectuando un modelo numérico y estudiando la variabilidad frecuencial. Todo esto ha permitido poder comparar la respuesta estructural mediante cada tipo de estudio y los resultados que se obtienen.

El análisis modal requiere más tiempo ya que hay que hacer los ensayos en laboratorio y el procesamiento de datos, mientras que el modelo numérico es más rápido pero para obtener resultados ajustados al modelo real se necesitan los datos de laboratorio. El estudio de variabilidad frecuencial requiere también más tiempo para el procesamiento de datos.

A continuación se exponen las conclusiones de este estudio, una ampliación de éste y posibles líneas futuras.

5.1 Conclusiones

La finalidad del estudio es poder determinar una correlación entre el daño y el número de componentes principales necesarias para explicar la variabilidad de las frecuencias modales con la temperatura. Para una buena caracterización del modelo numérico de la estructura se ha realizado un análisis modal operacional. Con los resultados obtenidos se ha dibujado el comportamiento modal de la estructura, es decir, el movimiento de ésta para cada modo de vibración.

Los resultados son limitados debido a que al tener sensores colocados únicamente en una sección de la estructura sólo se ha obtenido el comportamiento en esa sección. El comportamiento del resto de la estructura se puede deducir, pero sería más preciso con más acelerómetros colocados en otros nodos. También hay que tener en cuenta que en un ensayo experimental el error es más alto, por ello se han realizado muchos ensayos de laboratorio para evitar errores y descartar aquellos en los que los datos obtenidos son muy distintos al resto.

Mediante el análisis modal se ha visto que el comportamiento de los primeros nodos, aquellos que tienen valores más bajos de frecuencias, son flexiones. Y a medida que va aumentando la frecuencia los movimientos de la estructura son más complejos, como torsiones y modos superiores de flexión, flexo-torsiones y cizallas longitudinales.

Para este análisis se ha trabajado con los primeros 10 modos, ya que los datos de los modos superiores son más complicados de procesar porque a altas frecuencias las respuestas son más complejas.

El modelado numérico ha consistido en simular la estructura sin daño aplicado en el programa SAP2000. Durante la modelación han surgido dudas sobre la unión de la estructura con la mesa vibratoria realizando así dos modelos, uno empotrado y otro articulado. A partir de los resultados obtenidos de los dos modelos y con la posterior calibración de cada uno de ellos se ha comprobado que la estructura probablemente se comporta como articulada en su base. También mediante el modelado numérico se han obtenido los movimientos de la estructura en cada modo. En este caso los movimientos son de toda la estructura.

Con el análisis se sabe el comportamiento de la estructura en una sección, en cambio, con el modelo numérico se obtiene la respuesta estructural entera. Aun así el modelo numérico necesita los datos experimentales para poder ajustarse a la realidad.

El último estudio realizado en esta tesina es la variabilidad de las frecuencias modales con la temperatura. Ha consistido en determinar frecuencias modales a diferentes temperaturas y ensayos (sin daño y con daños aplicados).

Generalmente no se han observado grandes cambios frecuenciales dentro de un mismo ensayo, pero sí una pequeña disminución de la frecuencia a medida que la temperatura aumenta. Éste efecto se ha visto en todos los tipos de ensayos para los modos con alta frecuencia.

Una vez agrupadas las frecuencias por modos y a distintas temperaturas, estos datos se han introducido en el programa SPSS. La finalidad de trabajar con el SPSS es obtener las componentes principales de cada ensayo realizado en laboratorio, es decir, una reducción de la dimensionalidad de cada uno de los conjuntos de datos.

Mediante este estudio se ha observado que los ensayos con daño aplicado requieren más componentes principales que el ensayo sin daño. Dentro de los ensayos con daño aplicado, a más daño estructural la primera componente se reduce y aumenta la segunda, necesitando así más componentes para explicar la reducción.

Por tanto, a partir de los estudios de variación frecuencial y componentes principales se pueden deducir los daños en una estructura y también la magnitud de éstos. Viendo así que es una técnica práctica y muy útil para un caso real.

Como conclusión final, a partir del análisis modal y la modelación numérica se puede predecir el comportamiento de una estructura frente a vibraciones externas a las propias de ésta. Y con los estudios de variación frecuencial y componentes principales se pueden deducir los daños en una estructura y también la magnitud de éstos, viendo así que es una técnica práctica y muy útil para un caso real.

5.2 Ampliación y líneas futuras de trabajo

La principal línea futura de trabajo es la determinación del índice de daño a la que se ha sometido la estructura para correlacionarlo con el número de componentes principales requeridas.

Como ampliación de este trabajo se podría completar el análisis modal operacional con nuevos ensayos a temperatura ambiente. También podría realizarse un análisis modal operacional para ensayos con distintos grados de daño. Aplicar daños distintos a la estructura, ya sea en otros nodos de la misma planta trabajada como en otras plantas. Con estos nuevos daños podrían efectuarse los mismos estudios realizados aquí, viendo así como responde la estructura.

Debido al comportamiento no lineal de la estructura se podría golpear la mesa vibratoria con una fuerza distinta, ya sea mayor o menor, y volver a realizar los ensayos aquí explicados. Con ellos podrían verse las reacciones estructurales frente a distintas vibraciones externas.

Y un análisis modal pushover de la estructura para obtener el comportamiento de ésta frente a grandes vibraciones o terremotos de gran magnitud. Este análisis puede efectuarse tanto en laboratorio como en el modelado numérico, así se complementarían los resultados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Benedettini, F., y Gentile, C., 2007. *Ambient vibration testing and operational modal analysis of a masonry tower*. International Operational Modal Analysis Conference. Disponible en: <http://iomac.eu/iomac/2007/pdf/65benedettini-35.pdf> [último acceso: Junio 2016].

Brincker, R., Zhang, L. y Andersen, P., 2001. *Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition*. Smart Materials and Structures, vol. 10 441-445 pp. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/231090675_Modal_identification_of_output_only_systems_using_Frequency_Domain_Decomposition [último acceso: Junio 2016].

Brüel & Kjaer, 2016. *Charge Amplifier – Type 2635*. Disponible en: <http://www.bksv.com/Products/transducers/conditioning/charge/2635> [último acceso: Junio 2016].

Brüel & Kjaer, 2016. *High-density 12-channel input module – LAN-XI Type 3053*. Disponible en: <http://www.bksv.com/Products/frontends/lanxi/modules/type-3053?tab=accessories> [último acceso: Junio 2016].

Brüel & Kjaer, 2016. *Piezoelectric Charge Accelerometer Types 4370 and 4370-V*. Disponible en: <http://www.bksv.com/Products/transducers/vibration/accelerometers/accelerometers/4370> [último acceso: Junio 2016].

Brüel & Kjaer, 2016. *Piezoelectric Charge Accelerometer Types 4371 and 4371-V*. Disponible en: <http://www.bksv.com/Products/transducers/vibration/accelerometers/accelerometers/4371> [último acceso: Junio 2016].

Brüel & Kjaer, 2016. *Piezoelectric Charge Accelerometer Types 4384 and 4384-V*. Disponible en: <http://www.bksv.com/Products/transducers/vibration/accelerometers/accelerometers/4384> [último acceso: Junio 2016].

Computers& Structures Inc., 2016. *SAP2000 v18, Integrated software for structural analysis and design*. Disponible en: <https://www.csiamerica.com/products/sap2000> [último acceso: Junio 2016].

Foti, D. y Canas, J., 1999. *Earthquake simulator testing of a Steel model seismically protected with friction energy dissipators*. Monograph Series in Earthquake Engineering IS-34.

Gentile, C. y Saisi, A., 2007. *Ambient vibration testing of historic masonry towers for structural identification and damage assessment*. Construction and Building Materials, vol. 21 1311-1321 pp. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/222394094_Ambient_Vibration_Testing_of_Historic_Masonry_Towers_for_Structural_Identification_and_Damage_Assessment [último acceso: Junio 2016].

Le, T. H. y Tamura, Y., 2009. *Modal identification of ambient vibration structure using frequency domain decomposition and wavelet transform*. The Seventh Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, November 8-12. Disponible en: http://www.iawe.org/Proceedings/7APCWE/M1D_3.pdf [último acceso: Junio 2016].

Muñoz, F. y Maristany, J., 2002. *Modelización numérica y virtualización de edificios históricos*. Interface GiD-Sap2000-VRML. GiD Convention. Disponible en: ftp://www.gidhome.com/pub/GiD_Convention/2002/papers/22_MunozSalinas.pdf [último acceso: Junio 2016].

Nippon Avionics Co, LDT, 2016. *Thermo GEAR G120EX/G100EX Series*. Disponible en: <http://www.infrared.avio.co.jp/en/products/ir-thermo/lineup/g120ex-g100ex/index.html> [último acceso: Junio 2016].

Rodríguez, M., 2005. *Análisis modal operacional: teoría y práctica*. Proyecto fin de carrera. Escuela Superior de Ingenieros. Universidad de Sevilla.

Terrádez, M., 2002. *Análisis de componentes principales*. Disponible en: http://www.uoc.edu/in3/emath/docs/Componentes_principales.pdf [último acceso: Junio 2016].